



universidade
de aveiro

2011

Departamento de Engenharia da Cerâmica e do Vidro

Liliana Catarina Estudo de caldas de injeção para consolidação
Duarte Azeiteiro de revestimentos



Liliana Catarina Duarte Azeiteiro **Desenvolvimento de caldas de injeção para a consolidação de revestimentos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia dos Materiais realizada sob a orientação científica do Prof. Dr. Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica do Prof. Dr. Pedro Manuel Lima Quintanilha Mantas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho:

Aos meus filhos, por toda alegria que me dão

Aos meus pais, pelo apoio incondicional

A toda a minha família, especialmente à minha cunhada

Paula, ao meu irmão Ulisses e aos meus sobrinhos Mariana e Rafael

A todos os meus amigos, sem exceção.

O júri

Presidente

Professor Doutor José Maria da Fonte Ferreira,
Universidade de Aveiro

Professora Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga,
Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC

Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira,
Universidade de Aveiro

Professor Doutor Pedro Manuel Lima de Quintanilha Mantas,
Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Victor Ferreira pela orientação do trabalho e pela sua permanente disponibilidade, apoio, motivação e pela transmissão de conhecimento e sugestões.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Pedro Mantas pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

À engenheira Helena Paiva pela sua ajuda preciosa, quer a nível da transmissão de conhecimentos quer a nível dos ensaios laboratoriais, opiniões, sugestões, incentivo e conhecimentos transmitidos.

À engenheira Maria Carlos, aos técnicos de laboratório de Engenharia Civil, Victor e João, pela disponibilidade na parte laboratorial.

Aos técnicos do Departamento de engenharia Cerâmica e do Vidro, pela colaboração e prontidão dispensada, nomeadamente à eng^a Célia Miranda, à eng^a Ana Ribeiro.

Aos meus filhos, pelo incentivo e vontade de viver que me proporcionam e por quem lutarei sempre.

Aos meus pais, à minha cunhada Paula e ao meu irmão Ulisses, por nunca deixarem de acreditar em mim e me apoiarem sempre em todos os momentos da minha vida.

À minha família pela amizade.

A todos os meus amigos desde os antigos aos mais recentes pelo constante apoio, companheirismo, amizade e paciência.

Ao Tiago Apache pelo apoio permanente, à Carla Pereira e à Sandra Soares pela amizade e apoio transmitido.

Palavras-chave

Conservação, revestimentos antigos, cal aérea, caldas de cal, aderência

Resumo**Estudo de caldas de injeção para a consolidação de revestimentos**

Os revestimentos antigos eram feitos à base de cal e neste momento é uma missão importante preservar e restaurar o nosso património edificado. Em Portugal existe, ainda, uma lacuna na área da conservação de revestimentos. A utilização que actualmente se faz de argamassas de cimento para a substituição de rebocos antigos não respeita as características e os materiais originais dos suportes onde são aplicados, sendo os resultados bem conhecidos: destacamentos, afloramentos de sais solúveis, fissuração, entre outros.

É, então, de extrema importância alcançar uma composição compatível ao nível químico, mecânico e físico com o revestimento original. Na sequência desta necessidade, desenvolveu-se um estudo sobre a consolidação de revestimentos históricos com perda de aderência, constituídos por cal aérea.

O presente trabalho teve como principal objectivo desenvolver caldas de injeção (*grouts*) para a consolidação de revestimentos destacados do suporte. Pretendeu desenvolver-se estas caldas de injeção estudando-se o seu comportamento reológico no estado fresco. Efectuou-se a escolha dos materiais a utilizar e delineou-se uma série de ensaios mecânicos e físicos a realizar.

Iniciou-se o trabalho com o estudo do comportamento reológico de uma argamassa base, constituída por cal aérea, farinha de sílica e água. O teor da água de amassadura também foi um factor tido em consideração para a análise do comportamento reológico. Procedeu-se, de seguida, à caracterização reológica de diversas caldas de

injecção, com e sem adjuvantes e aditivos, usando um reómetro específico para argamassas.

O perfil utilizado para avaliar o comportamento reológico foi o perfil em patamar, que permite estudar o comportamento ao longo do tempo, através das curvas de fluxo medidas durante ensaio. Concluiu-se que o comportamento das caldas pode ser descrito em termos reológicos pelo modelo de Bingham. O perfil em patamar permite, então, avaliar os parâmetros reológicos determinados de acordo com este modelo, ou sejam, a tensão de cedência e a viscosidade plástica.

As caldas de injecção baseiam-se em cal aérea e contêm aditivos pozolânicos. Para se adequar à injecção nos destacamentos foram também introduzidos alguns adjuvantes. Os aditivos utilizados foram o metacaulino e a diatomite em quantidades de 10, 20 e 30 % da massa total do ligante. Os adjuvantes usados foram o éter de celulose, o gluconato de sódio e o Acril33, usados em quantidades entre 0,5 e 1 % da massa total de sólidos.

As caldas de injecção desenvolvidas foram comparadas, em termos de comportamento reológico, com duas pastas de cal (*grout*) comerciais. Era importante que os resultados obtidos para as caldas de injecção estudadas ficassem compreendidos no intervalo das duas pastas de cal comerciais.

Após os ensaios reológicos no estado fresco, passou-se aos ensaios no estado endurecido: de resistência mecânica, de capilaridade e de simulação da consolidação de destacamentos.

Os resultados das composições estudadas encontram-se dentro do intervalo dos valores aceitáveis e compatíveis com o revestimento de revestimentos antigos. Os valores da resistência mecânica à flexão estão compreendidos entre 0,2 e 0,7 MPa e os da resistência à compressão estão compreendidos entre 0,4 e 2,5 MPa.

A capilaridade é bastante influenciada pela quantidade da água de

amassadura, reflectindo-se essa influência também nos valores da resistência mecânica. Quanto maior a quantidade da água de amassadura, maior o valor do coeficiente de capilaridade.

Foram também preparados provetes de tijolo para simular as situações em “loco”. Esses provetes foram depois injectados com as caldas de cal estudadas e foram efectuados ensaios de aderência.

Tendo em conta os resultados obtidos, pôde concluir-se que constituindo-se caldas de cal, de traço 1:3, com cal aérea, farinha de sílica e metacaulino ou diatomite diluindo-se com 60% de água e adjuvantes em pequenas quantidades é possível utilizar-se estas caldas em trabalhos de consolidação de revestimentos antigos, por injeccção. Neste trabalho foi possível desenvolver-se dez caldas com estas características.

Keywords

Conservation, old renders, lime mortars, grout, adhesion

Abstract**Development of grouts for consolidation of old renders**

The importance of old buildings restoration is growing in the construction working sector. In historical heritage, preventive and conservative interventions should be favoured to avoid the extraction of historical elements.

The use of cement mortar for replacing old renders does not respect the characteristics of the original applied materials as well as its traditional process of application. Therefore, problems such as detachments, cracking, surge of soluble salts, among others are well known.

Consequently it is very important to achieve a composition that is deemed consistent with the original render at the chemical, mechanical and physical levels. In this work, a research was developed on grouts to consolidate old lime-based renders with loss of adhesion.

The main objective of this work is to study grouts for the consolidation of coatings detached from the support. The study was conducted on the rheological behaviour of the grouts in the fresh state. A careful choice was made of materials to be used and an outlined series of mechanical and physical tests to be performed.

The development of the grout began with the study of the rheological behaviour of a mortar base, consisting of lime, silica flour and water. The water content for kneading was also a factor under consideration. The rheological behaviour of the mortar, with and without admixtures, was performed through a specific

rheometer for mortars.

The rheological behaviour was evaluated through a distinct procedure, which involved the test with a speed profile at constant rotation speed (dwell profile). The dwell profile allows studying the rheological behaviour along measuring time, making possible to observe the structural destruction phenomena, existent in mortar suspensions, through the measurement of flow curves along the test time. The dwell profile allowed a precise evolution of the rheological parameters, determined according to the Bingham model, e.g., the yield stress and the plastic viscosity.

The grouts were tested with lime and pozzolanic additives. To suit the injection detachments, adjuvant materials were also introduced. The additives used were: metakaolin and diatomite in quantities of 10, 20 and 30 % of the total mass of the binder. The adjuvant materials used were the cellulose ether, sodium gluconate and Acryl 33, in quantities between 0.5 and 1 % of the total mass of solids.

Developed grouts were compared in terms of rheological behaviour with two commercial grouts. It was important that the results of the study grouts stay between the ranges of these two commercial grouts.

The compositions results are within the range of acceptable values and are compatible with the coating of old renders. The values of flexural strength are between 0.2 and 0.7 MPa and compressive strength is between 0.4 and 2.5 MPa.

The capillary is strongly influenced by the quantities of mixing water, which is reflected also in the mechanical strength values. The greater the quantity of mixing water, the greater the coefficient of capillarity.

Brick samples were also prepared to simulate the situation *in loco*. These samples were then injected with the grouts studied and been tested for adhesion.

In conclusion grouts, in the proportion 1:3, with lime, silica flour, diatomite or metakaolin by diluting with 60 % of water and adjuvant in small quantities, can be used in consolidation works of old renders. This work permitted to develop ten mixtures with these characteristics.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Contextualização e interesse do tema	1
1.2	Objectivos.....	3
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Estado da arte	5
2.1	Conservação do património arquitectónico	5
2.2	Revestimentos de paredes	6
2.2.1	Revestimentos antigos	6
2.2.2	Características das argamassas de reboco de substituição	7
2.2.3	Patologias de rebocos antigos.....	13
2.3	Argamassas de revestimentos.....	25
2.3.1	Ligantes.....	27
2.3.2	Agregados	32
2.3.3	Água da amassadura	34
2.3.4	Adjuvantes.....	34
2.3.5	Aditivos	40
2.4	Comportamento reológico	42
2.4.1	Reologia de fluidos e suspensões	43
2.4.2	Reologia de pastas, argamassas e betões	45
2.4.3	Efeito dos adjuvantes sobre o comportamento reológico	47
2.5	<i>Grouts</i> – consolidação de revestimentos.....	48
2.5.1	Técnicas de injeção	49
2.5.2	Propriedades das caldas de injeção	49
3	Procedimento experimental.....	53
3.1	Descrição geral	53
3.2	Formulações iniciais dos <i>grouts</i>	53
3.3	Ensaio de caracterização	55
3.3.1	Caracterização das matérias-primas	55
3.3.2	Ensaio de pozolanicidade (Chapelle modificado)	57
3.4	Comportamento reológico	58
3.4.1	Preparação das caldas de injeção (<i>grout</i>)	58

3.4.2	Avaliação da tensão de cedência e viscosidade por reometria	59
3.5	Ensaio de simulação de consolidação de revestimentos.....	60
3.5.1	Ensaio de consistência do <i>grout</i> e do reboco (ultra-sons)	63
3.5.2	Ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão (tubos de Karsten)	64
3.5.3	Ensaio de aderência no <i>grout</i> e reboco envolvente.....	64
3.6	Características físicas	65
3.6.1	Execução de provetes de <i>grout</i>	65
3.6.2	Ensaio de retracção	66
3.6.3	Resistência mecânica à flexão e à compressão	67
3.6.4	Capilaridade.....	69
4	Resultados e discussão	71
4.1	Comportamento reológico de argamassas.....	71
4.2	Efeito dos adjuvantes no comportamento reológico	75
4.2.1	Efeito do agente retentor de água	75
4.2.2	Efeito do agente plastificante	77
4.3	Efeito dos aditivos no comportamento reológico	79
4.3.1	Efeito do metacaulino (argical 1200).....	79
4.3.2	Efeito da diatomite.....	80
4.4	Estudo reológico de <i>grout</i> com traço 1:3	83
4.4.1	Caldas de cal com metacaulino	83
4.4.2	Caldas de cal com diatomite.....	92
4.4.3	Caldas de cal usadas nos ensaios mecânicos.....	95
4.5	Ensaio de consolidação de revestimentos.....	96
4.5.1	Ensaio para verificar o tempo de propagação no <i>grout</i> e no reboco envolvente, usando a PUNDIT	96
4.5.2	Ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão (tubos de Karsten).....	97
4.5.3	Ensaio de aderência no <i>grout</i> e no reboco	102
4.6	Características físicas dos grouts.....	106
4.6.1	Retracção livre.....	106
4.6.2	Resistência mecânica	108
4.6.3	Capilaridade.....	113
4.7	Síntese dos resultados	114

5	Conclusões	119
	Bibliografia.....	121

Índice de figuras

Figura 2.1 – Fases de degradação por perda de material em argamassas de cal: inicialmente, dá-se a fissuração da argamassa (1), conduzindo ao descolamento e desprendimento da camada de acabamento, mais carbonatada e mais rígida (2), as camadas interiores do reboco ficam expostas e sujeitas a fenómenos de perda de coesão e de lavagem dos constituintes da argamassa (3) [Gaspar <i>et al</i> , 2007].	21
Figura 2.2- Da esquerda para a direita, exemplos de pulverização, de arenização e de erosão.	24
Figura 2.3 - Imagens da rocha calcite (CaCO_3).	32
Figura 2.4 - Partículas de argamassa floculadas, aglomeradas pelas tensões capilares devidas à presença de ar e água [9].	36
Figura 2.5-Ao adicionar –se um agente plastificante à água, este é adsorvido pela superfície das partículas da argamassa, expulsando o ar [Coutinho, 1998].	38
Figura 2.6 - (a) Na ausência de agentes redutores da água da amassadura (plastificantes), a quantidade de água para a mobilidade das partículas é grande. (b) Na presença de agente redutor da água de amassadura (plastificante), as partículas repelem-se e a água que fica livre entre elas não é necessária para a sua mobilidade. (c) A distância entre as partículas reduz-se e a água em excesso pode ser dispensada [Coutinho, 1998].	38
Figura 3.1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado (Farinha de sílica SS- 160) utilizado na composição das caldas de injeção.	56
Figura 3.2 - Curva de distribuição granulométrica do metacaulino (argical 1200) utilizado nas caldas de injeção.	56
Figura 3.3 - Curva de distribuição granulométrica da diatomite utilizada nas caldas de injeção.	57
Figura 3.4 - Curva de distribuição granulométrica da areia do rio (Martins, 2008), usada na elaboração dos provetes de tijolo.	57
Figura 3.5 - Reómetro utilizado para argamassas (Viskomat)	59
Figura 3.6 - Fotografias da mesa de espalhamento, do espalhamento em si e da camada de chapisco.	60
Figura 3.7 - Camada de emboco.	61
Figura 3.8 - Introdução das placas de acrílico.	61
Figura 3.9 - Segunda camada de argamassa	62
Figura 3.10 a, b) Proвете pronto para injeção do <i>grout</i> , e c) Preparação do orifício entre camadas.	62
Figura 3.11- Injeção de caldas de cal.	62
Figura 3.12 - Ensaio de propagação de tempo usando uma Pundit.	63
Figura 3.13- Ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão (tubos de Karsten).	64
Figura 3.14 – Provetes prismáticos.	65
Figura 3.15 – Provetes prismáticos na sala de acondicionamento.	66
Figura 3.16 – Moldes circulares.	66
Figura 3.17– Provetes circulares	66
Figura 3.18 - Ensaio de flexão dos provetes prismáticos.	67
Figura 3.19 - Ensaio de compressão dos provetes prismáticos.	68
Figura 3.20 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.	69
Figura 4.1 - Variação do torque em função do tempo de ensaio para a argamassa base com 60% de água de amassadura (perfil patamar a 160 rpm).	71
Figura 4.2 - Variação do torque com o tempo de ensaio das pastas de cal de referência (PMLA e PMLI).	72
Figura 4.3 - Variação do torque com o tempo de ensaio das pastas de cal de referência (PMLA e PMLI) e a pasta de cal hidratada base, GCA_12_60W.	73
Figura 4.4 - Curva de fluxo obtida com a argamassa base a 160 rpm para o tempo de ensaio de 0 min. As setas indicam a velocidade ascendente e descendente.	73

Figura 4.5- Curva de fluxo do <i>grout</i> obtida no minuto zero do ensaio num ensaio com perfil em patamar a 160 rpm. Determinação dos parâmetros reológicos de acordo com o modelo de Bingham.	74
Figura 4.6 - Parâmetro reológico h das caldas de cal comerciais e do <i>grout</i> base, GCA_12_60W.	75
Figura 4.7 - Parâmetro reológico g das caldas de cal comerciais e do <i>grout</i> base, GCA_12_60W.	75
Figura 4.8- Efeito do teor do agente retentor de água, EC, sobre o parâmetro reológico g, determinado a partir de ensaios efectuados com um perfil em patamar (60% água de amassadura).	76
Figura 4.9- Efeito do teor do agente retentor de água, EC, sobre o parâmetro reológico g, determinado a partir de ensaios efectuados com um perfil em patamar (60% água de amassadura).	77
Figura 4.10 - Efeito do agente plastificante sobre o parâmetro reológico h, determinado a partir de ensaios efectuados com um perfil em patamar (argamassa com 60% de água de amassadura).	78
Figura 4.11- Efeito do agente plastificante sobre o parâmetro reológico g, determinados a partir de ensaios efectuados com um perfil em patamar (argamassa com 60% de água de amassadura).	78
Figura 4.12- Efeito do metacaulino (10, 20% sobre o teor de ligante) no parâmetro reológico h, tendo como base de comparação a argamassa base, GCA_12_60W.	79
Figura 4.13- Efeito do metacaulino (10, 20% sobre o teor em ligante) no parâmetro reológico h, tendo como base de comparação a argamassa base, GCA_12_60W.	80
Figura 4.14 - Efeito da diatomite (10, 20% sobre o teor de ligante) no parâmetro reológico h, tendo como base de comparação a argamassa base, GCA_12_60W.	80
Figura 4.15 - Efeito da diatomite (10, 20% sobre o teor em ligante) no parâmetro reológico g, tendo como base de comparação a argamassa base, GCA_12_60W.	81
Figura 4.16 - Gráficos comparativos dos valores de h e g para o metacaulino e para a diatomite.	81
Figura 4.17- Comparação dos valores de h para duas argamassas diferentes, com a mesma composição mas para diferentes traços.	82
Figura 4.18- Comparação dos valores de g para duas argamassas diferentes, com a mesma composição mas para diferentes traços.	82
Figura 4.19- Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico h, em caldas de cal com 10% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).	83
Figura 4.20 Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico g, em caldas de cal com 10% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).	84
Figura 4.21- Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico h, em caldas de cal com 20% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).	84
Figura 4.22 - Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico g, em caldas de cal com 20% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).	85
Figura 4.23 - Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico h, em caldas de cal com 30% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).	85
Figura 4.24 - Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico g, em caldas de cal com 30% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).	86
Figura 4.25 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio (GS) na calda de cal com escolhida, com 10% metacaulino GCA_13_60W_10argical_0.6EC, na viscosidade (h).	87
Figura 4.26 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio na calda de cal, com 10% metacaulino escolhida, GCA_13_60W_10argical_0.6EC, na tensão de cedência (g).	87
Figura 4.27 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio nas caldas de cal com 20% de metacaulino e 0,5EC e 0,6EC na viscosidade (h).	88
Figura 4.28 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio nas caldas de cal com 20% de metacaulino e 0,5EC e 0,6EC na tensão de cedência (g).	88
Figura 4.29 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio nas caldas de cal com 30% de metacaulino e 0,5EC e 0,6EC na viscosidade (h).	89
Figura 4.30- Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio nas caldas de cal com 30% de metacaulino e 0,5EC e 0,6EC na tensão de cedência (g)	89

Figura 4.31- Efeito do teor em metacaulino, com 0,4EC, 1GS e 0,5A33 nos valores da viscosidade (h).	90
Figura 4.32 - Efeito do teor em metacaulino, com 0,4EC, 1GS e 0,5A33 nos valores da tensão de cedência (g)......	90
Figura 4.33 - Comportamento reológico, h e g, das caldas de cal que vão ser usadas para injeção, com 20% de metacaulino.	91
Figura 4.34 - Comportamento reológico, h e g, das caldas de cal que vão ser usadas par injeção, com 30% de metacaulino.	91
Figura 4.35 - Comportamento reológico, h e g, das caldas de cal que vão ser usadas par injeção, com 10% de diatomite.	92
Figura 4.36 - Comportamento reológico, h e g, das caldas de cal que vão ser usadas para injeção, com 20% de diatomite.	93
Figura 4.37 - Comportamento reológico, h e g, das caldas de cal que vão ser usadas par injeção, com 30% de diatomite.	94
Figura 4.38 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.....	98
Figura 4.39 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.....	98
Figura 4.40 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_20Arg_0.5EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.....	99
Figura 4.41- Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_30Arg_0.4EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete....	100
Figura 4.42 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_30Arg_0.5EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete....	100
Figura 4.43- Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_10Dia_0.5EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete. ...	101
Figura 4.44 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_20Dia_0.5EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete. ...	101
Figura 4.45 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_30Dia_0.4EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete. ...	102
Figura 4.46 - Esquema descritivo do tijolo, onde se descreve as diversas interfaces existentes	103
Figura 4.47 - Ensaio de aderência no grout e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33.....	103
Figura 4.48 - Ensaio de aderência no grout e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_20Arg_0.5EC_1GS_0.5A33.....	104
Figura 4.49 - Ensaio de aderência no grout e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_30Arg_0.4EC_1GS_0.5A33.....	105
Figura 4.50 - Ensaio de aderência no grout e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_20Dia_0.5EC_1GS_0.5A33	105
Figura 4.51 - Ensaio de aderência no grout e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_30Dia_0.4EC_1GS_0.5A33	106
Figura 4.52 - Exemplos de provetes circulares após desmoldagem.	108
Figura 4.53 - Resistência à flexão dos provetes prismáticos aos 28 dias - quadro geral.	109
Figura 4.54 - Resistência dos provetes à compressão ao fim de 28 dias.	109
Figura 4.55 - Efeito da quantidade de metacaulino, argical 1200, nas propriedades mecânicas do proвете prismático.....	110
Figura 4.56 - Efeito da% de diatomite nas propriedades mecânicas dos provetes prismáticos.	110
Figura 4.57 – Influência do teor em éter de celulose, EC, nas propriedades mecânicas dos provetes prismáticos.	111
Figura 4.58 - Efeito do teor em éter de celulose, EC, na resistência à compressão.....	111

Figura 4.59 - Efeito da presença do agente adesivo acril 33 (A33) nas propriedades mecânicas dos provetes.	112
Figura 4.60 - Efeito da percentagem de água de amassadura sobre as propriedades mecânicas.....	113

Índice de tabelas

Tabela 2.1– Requisitos mínimos de argamassas de revestimento para edifícios antigos (adaptado de [Veiga <i>et al</i> , 2002b]).	13
Tabela 2.2- Classificação da natureza da cal de acordo com a matéria-prima.	28
Tabela 2.3 Relações entre a tensão de corte e o gradiente de velocidades (Ferraris (1999))	44
Tabela 2.4- Resumo dos requisitos a garantir às caldas de injeção.	51
Tabela 3.1 – Formulações iniciais dos <i>grouts</i> no traço 1:2 (razão volúmica ligante: agregado)	54
Tabela 3.2 – Formulações iniciais dos <i>grouts</i> no traço 1:3 (razão volúmica ligante:agregado).	54
Tabela 3.3- Materiais utilizados na composição dos <i>grouts</i>	55
Tabela 3.4 - Resultados obtidos pelo ensaio modificado de Chapelle	58
Tabela 4.1- Composições escolhidas para a injeção dos provetes de tijolo e para a preparação dos provetes prismáticos.	95
Tabela 4.2- Tempo de propagação no grout e no reboco envolvente, usando uma Pundit.	96
Tabela 4.3 - Amostras onde se realizou o ensaio de aderência nos provetes de tijolos.	102
Tabela 4.4-Valores de retracção livre nos diâmetros de argamassas contendo 50% de água.	107
Tabela 4.5 - Coeficiente de capilaridade das argamassas de grout com 50% de água (W).	113
Tabela 4.6 - Comparação do coeficiente de capilaridade de três caldas de cal com a mesma composição mas com diferentes quantidades de água (40, 45, 50%).	114

1 Introdução

1.1 Contextualização e interesse do tema

O parque edificado nacional é maioritariamente constituído por edifícios com muitos anos de vida, que necessitam de intervenção, nomeadamente ao nível dos revestimentos. No caso do Património Histórico essas intervenções sobre os revestimentos devem ser de carácter preventivo e conservativo, evitando a sua remoção. Os revestimentos antigos são considerados históricos na medida em que usam técnicas hoje em dia abandonadas e praticamente esquecidas, mas muito representativas da arte e do engenho das gerações passadas. A sua localização no edifício torna-os elementos com grande impacto visual e elevada vulnerabilidade à degradação por acções externas. Os revestimentos antigos chegam até nós em bom estado de conservação com centenas de anos, mostrando a sua excelente durabilidade.

Com o tempo, no entanto, agressões externas e ausência de manutenção levam ao envelhecimento natural e à degradação dos revestimentos. Removê-los ou substituí-los por outros é perder património histórico, testemunhos de técnicas antigas, e desvalorizar a imagem do edifício. Para os conservar, é necessário conhecer metodologias que permitam restituir a integridade estética e a capacidade funcional, em condições muitas vezes mais adversas do que as originais. Estas intervenções necessitam de respeitar a compatibilidade entre os materiais novos e os antigos, sob pena de causarem outras anomalias, devendo também possuir uma durabilidade satisfatória.

Ao longo dos últimos anos difundiu-se a ideia de que o melhor método de recuperação é extrair todo o revestimento e refazê-lo, com materiais supostamente mais resistentes e duráveis – o cimento, as resinas sintéticas, os pigmentos orgânicos, as argamassas pré doseadas – o que tem conduzido a grandes insucessos pela ausência de pormenorização e pela simplificação grosseira induzida pelas técnicas modernas. A sólida durabilidade e o suave envelhecimento dos acabamentos de cal são trocados pela degradação rápida dos novos materiais, como a fissuração e os destacamentos das argamassas com cimento e as manchas resultantes das alterações cromáticas das resinas pigmentadas. O mais grave é a substituição dos materiais tradicionais pelos modernos com características diferentes,

alterando profundamente o funcionamento global da parede, nomeadamente no que diz respeito aos movimentos da água e, consequentemente, dos sais, no sistema suporte/revestimento. Estas alterações conduzem muitas vezes a uma degradação acelerada de toda a parede. Trata-se claramente de uma questão de compatibilidade.

Um correcto planeamento da intervenção implica, assim, um conhecimento detalhado da constituição dos revestimentos – das várias camadas e da composição de cada uma. Em geral, os revestimentos antigos são constituídos por argamassas de cal aérea e areia.

Como se tem vindo a verificar, as argamassas de cimento, adequadas para as construções modernas são incompatíveis com a generalidade das construções antigas e, ao contrário do que se pensou durante algum tempo, têm, nestas circunstâncias, menor durabilidade que as de cal desde que estas sejam executadas e aplicadas correctamente.

Apesar do estado fresco de uma argamassa durar um período de tempo muito diminuto comparativamente à vida útil da mesma, o controlo das suas características reológicas tem uma importância fundamental pois o seu comportamento durante este período influencia muito a sua aplicação, evolução e propriedades após endurecimento. O comportamento reológico de uma argamassa define a facilidade de projecção, espalhamento, nivelamento, acabamento e, também, os níveis de aperto a que pode ser sujeita. A caracterização reológica de argamassas de cal é ainda muito incipiente. Tendo como objectivo melhorar ou ajustar determinadas características das argamassas, quer no estado fresco quer no estado endurecido, é comum usar diversos tipos de adjuvantes os quais são indispensáveis para conseguir determinadas características técnicas das argamassas modernas baseadas em cimento. Os adjuvantes mais usados são os agentes retentores de água, os agentes redutores de água ou plastificantes e os agentes adesivos.

No sentido de colmatar a insuficiência de estudos existentes nesta área, o trabalho pretendeu focar sobre o tema da conservação e durabilidade de revestimentos históricos, particularmente, no desenvolvimento de caldas de injeção para a consolidação de revestimentos.

1.2 Objectivos

O principal objectivo deste trabalho é o desenvolver uma calda de cal (*grout*) que vise a consolidação de revestimentos de paredes, passível de ser injectada e que seja compatível química, física e mecanicamente com os materiais pré-existentes. É imprescindível que o *a* calda restitua a aderência aos revestimentos tradicionais em casos de destacamentos ou empolamentos.

Pretende-se especificamente estudar o comportamento reológico de caldas no estado fresco, de maneira a otimizar o comportamento necessário para se proceder a uma melhor injeção das caldas de cal (*grout*).

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, cujo conteúdo será apresentado nos parágrafos seguintes.

O capítulo 1 consiste na parte introdutória do trabalho. Inicialmente é realizada a contextualização e interesse do tema perante a actualidade da construção no país. De seguida são estabelecidos, os principais objectivos do estudo. E por último, descreve-se a forma como a informação se apresenta organizada ao longo da dissertação.

No capítulo 2 é realizada uma pesquisa bibliográfica e a sua análise de forma a adquirir um conhecimento geral acerca do tema. Inicia-se como uma análise sobre os revestimentos de paredes, apontando a sua constituição, as suas características, os seus requisitos, as suas funções e as suas patologias. Fala-se sobre agregados e a cal aérea, assim como dos restantes constituintes das caldas de injeção, tais como, os aditivos e os adjuvantes usados. Termina-se com o comportamento reológico das caldas de cal (*grouts*), com a descrição do reómetro, e do método usado no estudo reológico das caldas estudadas.

No capítulo 3 segue-se a apresentação do procedimento experimental, o qual tem por base a avaliação das propriedades das diferentes argamassas estudadas. Nesta fase define-se toda a campanha experimental, englobando os ensaios a realizar e os respectivos procedimentos laboratoriais, atendendo à normalização europeia.

No capítulo 4 são avaliados e discutidos todos os resultados obtidos ao longo do trabalho. Caracterizou-se os *grouts* no estado fresco e no estado endurecido aos 28 dias. Os resultados são analisados e discutidos a partir da comparação com várias formulações e com outros resultados laboratoriais obtidos em trabalhos realizados anteriormente, discriminados na bibliografia.

Para finalizar, o capítulo 5 é a conclusão, onde também se apresentam algumas propostas para o desenvolvimento de estudos futuros.

2 Estado da arte

2.1 Conservação do património arquitectónico

Há muitos séculos que existem manifestações de cuidados e de preocupação com a conservação do património arquitectónico, nomeadamente quanto à necessidade da sua salvaguarda para as gerações futuras. Durante muito tempo, no entanto, essa prática tendia a considerar apenas os monumentos aos quais se atribuíam importantes valores históricos, como os únicos objectos a conservar e proteger [Aguiar et al, 2000a].

Hoje, por toda a Europa e crescentemente em Portugal, a reabilitação tornou-se uma prática corrente e um conceito aplicável não só ao património urbano e arquitectónico tradicional mas também ao parque edificado ainda recente que, pela sua deficiente qualidade construtiva e urbanística, sofre inesperadas deficiências e rejeição para o seu curto tempo de vida. O objectivo fundamental de qualquer acção de reabilitação desenvolvida sobre um edifício consiste em resolver os danos físicos e a patologia construtiva e ambiental, acumuladas ao longo dos anos. Outro objectivo igualmente importante consiste em assegurar a salvaguarda, para as gerações vindouras, de um valioso património urbano e arquitectónico. De facto, e antes de tudo o mais, uma intervenção de reabilitação começa por ser uma operação que visa a maior conservação possível das diversas partes, elementos e materiais do imóvel sobre o qual incide [Aguiar et al, 2000a].

Desde os anos 60, contudo, com o culminar de um processo de substituição da cultura artesanal pela industrial, começou a verificar-se por toda a Europa um gradual desaparecimento dos revestimentos tradicionais com base em cal aérea e da mão-de-obra capaz de os executar e manter. Esses revestimentos foram massivamente substituídos por soluções contemporâneas, a maior parte das vezes recorrendo a argamassas executadas com cimento Portland. Hoje em dia, nos nossos monumentos e centros históricos, são muito raros os revestimentos originais e muito poucos os revestimentos de cal; e nem sempre as novas soluções e materiais utilizados para os substituir se revelam compatíveis com as características e exigências do património que agora recobrem [Veiga et al, 2002a].

Frequentemente, as intervenções realizadas em edifícios antigos passaram pela completa remoção dos revestimentos e pela sua substituição por revestimentos novos, não adaptados

à construção existente. As intervenções deste tipo, para além de serem descaracterizadoras dos edifícios têm dado origem a manifestações patológicas graves e à aceleração da degradação dos elementos preexistentes [Veiga et al, 2002a].

2.2 Revestimentos de paredes

2.2.1 Revestimentos antigos

Nos edifícios antigos, os revestimentos de paredes exteriores são dos elementos mais expostos às acções climáticas e de impacto mecânico e ambiental e, como tal, são dos primeiros a necessitar de intervenções. Por outro lado, a função que lhes cabe de protecção das paredes torna a sua manutenção de grande importância para a conservação das construções [Veiga et al, 2002b].

Nas paredes antigas rebocadas os revestimentos eram geralmente constituídos pelas seguintes camadas principais:

- para a regularização e protecção:
 - Emboço
 - Reboco
 - Esboço
- para a protecção, acabamento e decoração:
 - Barramento (ou guarnecimento)
 - Pintura, em geral mineral [Veiga et al, 2002c]

As camadas de regularização e protecção eram constituídas por argamassas de cal e areia, eventualmente com adições minerais e orgânicas. Normalmente as camadas internas tinham granulometria mais grosseira e a deformabilidade e porosidade iam aumentando das camadas internas para as externas, promovendo um bom comportamento das deformações estruturais originadas pela reacção com a água. Cada uma das camadas principais podia ser constituída por várias subcamadas. Com efeito, para a mesma espessura total, camadas finas (maior número de camadas) permitiam uma melhor capacidade de protecção e uma durabilidade superior [Veiga et al, 2002c].

Os barramentos ou guarnecimentos eram constituídos por massas finas de cal e pó de pedra, também geralmente aplicadas em várias subcamadas, com finura crescente das mais interiores para as mais exteriores. Estas camadas eram importantes para a protecção do reboco, verificando-se que, quando se destacam, se assiste a uma degradação rápida do reboco adjacente [Veiga et al, 2002c].

É corrente substituírem-se integralmente os rebocos de uma construção antiga por outros novos, de aspecto liso e coeso e cor homogénea, que no momento restituem um aspecto agradável às fachadas, mas nos quais se observa alguns meses depois, uma degradação generalizada, constituída, nomeadamente, por fendilhação e perda de aderência em largas zonas (evidenciada por um som a oco quando percutidos). Podem surgir, ainda, indícios de degradação da alvenaria que lhe serve de suporte, designadamente por perda de coesão e destacamento de camadas [Veiga et al, 2002b].

Numa intervenção num edifício antigo, a primeira opção deve ser sempre a da conservação. Esta opção é a mais correcta do ponto de vista da ética da conservação, que está hoje relacionada com a ecologia por via da sustentabilidade, e é também, em geral, a solução mais económica [Veiga et al, 2002b].

2.2.2 Características das argamassas de reboco de substituição

Muitas vezes os rebocos antigos apresentam-se superficialmente degradados – com microfendilhação, manchas devidas a ataque biológico e à acção da humidade, lacunas resultantes de destacamentos pontuais – mas encontram-se sãos, ou seja, coesos, aderentes à base na maior parte da sua área e com uma resistência razoável. Nestas situações é preferível mantê-los com as reparações pontuais necessárias. Existem também casos com algumas zonas de degradação mais profunda, com perda de aderência ou coesão deficiente, mas o valor patrimonial do revestimento justifica a opção pela conservação, recorrendo-se a técnicas de consolidação. Quando a degradação do reboco atinge um nível em que não é possível conservá-lo na íntegra, é necessário substituí-lo, parcial ou totalmente, por outro compatível com os elementos pré-existentes com os quais irá interagir.

Nas tomadas de decisões, é necessário ter em conta vários aspectos relacionados com a fidelidade histórica de preservação dos valores culturais, sendo também necessário garantir

a durabilidade do conjunto. Quando se recorre à substituição, parcial ou total, do reboco antigo, o revestimento deverá respeitar os seguintes requisitos gerais [Veiga et al, 2002b]:

- a) não contribuir para degradar os elementos pré-existentes, nomeadamente as alvenarias;
- b) proteger as paredes;
- c) não prejudicar a apresentação visual da arquitectura, nem descaracterizar o edifício;
- d) ser durável e contribuir para a durabilidade do conjunto.

Uma argamassa inadequada com efeito, pode provocar degradação em vez de proteger os elementos com os quais está em contacto:

- por introdução de tensões excessivas num suporte eventualmente fraco e com deficiências de coesão, em geral originadas pela retracção ou por variações dimensionais de origem térmica;
- no caso dos rebocos, pela tendência em reter a água no suporte, em vez de facilitar a sua secagem, provocando a patologia associada à humidade;
- no caso das juntas de refechamento, pela alteração dos caminhos preferenciais de circulação da água e do vapor de água das argamassas, (que eram primitivamente mais porosas e permeáveis, para a pedra ou o tijolo), se as argamassas de reparação forem mais impermeáveis;
- pela introdução, nas alvenarias e nas outras argamassas, de sais solúveis que não existiam antes, provenientes por exemplo do cimento.

A argamassa a formular não deve desenvolver tensões elevadas quando sofre variações de dimensões restringidas, deve dificultar a penetração da água até ao suporte e favorecer a evaporação da água que se introduziu, quer através da própria argamassa, quer através das fundações, por capilaridade ascendente, quer através de coberturas e remates. A argamassa não deve também ter na sua constituição materiais ricos em sais solúveis [Veiga *et al*, 2002b].

O número de camadas, a espessura, a composição relativa dessas camadas e a tecnologia de aplicação são aspetos muito importantes tal e qual o material a usar. Para que todos os

requisitos adquiram significado, a durabilidade é a palavra-chave para o êxito. Os elementos a proteger podem ser centenários, milenários, e é nesta escala de tempo que é preciso enquadrar a conservação. A durabilidade implica boa resistência mecânica, boa coesão interna, boa aderência ao suporte e entre camadas – mas não excessiva, para não impedir a reversibilidade – e boa resistência química, designadamente aos sais existentes nas paredes antigas. Implica ainda um bom comportamento à água: absorção relativamente lenta e facilidade de secagem.

Para muitos autores, a durabilidade das argamassas de cal está relacionada com a estrutura porosa, que comanda a capacidade para transportar, reter e expulsar a água por evaporação, influenciando também, em consequência, o comportamento aos sais e ao gelo. Além de que a estrutura porosa condiciona decisivamente a resistência mecânica. A durabilidade implica também resistência à colonização biológica, que se relaciona com a composição (os adjuvantes orgânicos podem tornar as argamassas mais susceptíveis a este tipo de degradação). O comportamento com a água, influencia também a colonização biológica, já que períodos longos de humedecimento aumentam a probabilidade de fixação de fungos [Veiga *et al*, 2002b].

Para verificar os requisitos referidos, o reboco tem que ser compatível com os elementos pré-existentes, o que implica duas condições fundamentais:

- uma execução cuidada, de acordo com as regras da boa arte;
- uma argamassa com características que garantam a compatibilidade.

A primeira condição influencia decisivamente a qualidade dos seus revestimentos e o seu desempenho. A segunda condição é bastante mais complexa. É necessário avaliar a compatibilidade sob vários aspectos e analisar as características das argamassas que a condicionam.

a) Compatibilidade mecânica

A compatibilidade mecânica entre o reboco e o suporte permite evitar grandes diferenças de rigidez, prevenindo a deterioração.

A compatibilidade mecânica da nova argamassa com os materiais pré-existentes é condicionada pelas características seguintes:

- resistência à tracção e à compressão;
- módulo de elasticidade;
- aderência ao suporte;
- forças induzidas por retracção restringida.

A nova argamassa deve ter características mecânicas semelhantes às das argamassas pré-existentes e sempre inferiores às do suporte. A distribuição das tensões deve manter-se semelhante à original. Os valores destas características não podem, no entanto, ser demasiado reduzidos, para garantir a capacidade de protecção e a durabilidade.

A aderência ao suporte é necessária para garantir a capacidade de protecção e durabilidade do revestimento, mas não deve ser excessiva e nunca deve ser superior à resistência à tracção do suporte, caso contrário contribui para degradar a alvenaria.

É muito importante limitar as tensões introduzidas no suporte devidas às variações dimensionais do revestimento: retracção, variações dimensionais de origem térmica ou devidas à humidade. Estas tensões estão relacionadas não só com a retracção livre e os coeficientes de condutibilidade térmica e higrométrica, mas também com o módulo de elasticidade e com a capacidade de relaxação de tensões da argamassa [Veiga *et al*, 2002b].

Deste modo é aconselhável o uso de um revestimento com fraca retracção durante o processo de endurecimento e com um módulo de elasticidade baixo de forma a acompanhar os movimentos do suporte, garantindo a sua deformabilidade (não deve também ser demasiado baixo para evitar que as deformações do suporte danifiquem o próprio revestimento).

b) Compatibilidade física

A compatibilidade física do reboco está relacionada com a sua capacidade de permitir trocas de humidade entre a parede e o exterior e com o seu coeficiente de condutibilidade térmica. Para que esta exista é necessário então que as características seguintes estejam em consonância com as dos elementos pré-existentes:

- permeabilidade à água e ao vapor de água;
- condutibilidade térmica e coeficiente de dilatação térmica.

O comportamento com a água é uma das propriedades mais importantes para um bom desempenho da argamassa. É necessário que a permeabilidade à água seja semelhante à das argamassas preexistentes e que seja inferior à do suporte, caso contrário a água passará a infiltrar-se pela alvenaria antiga, contribuindo para a sua degradação. A permeabilidade ao vapor de água deve ser tão elevada quanto possível, para favorecer a evaporação da água infiltrada ou absorvida. A retenção da água na alvenaria degrada a parede por dissolução dos constituintes e, através da cristalização dos sais, origina um ambiente húmido e insalubre [Veiga *et al*, 2002b].

Estas características dependem da estrutura dos poros. Assim, se fosse possível definir *a priori* essa estrutura, seria relativamente fácil controlar o comportamento com a água. Na realidade, isso não é possível, apenas se podendo formular hipóteses e confirmar *a posteriori* [Veiga *et al*, 2002b].

c) Compatibilidade química

A compatibilidade química está relacionada com o comportamento do reboco face aos sais. As alvenarias antigas apresentam, por norma, grande teor em sais solúveis, principalmente sulfatos. O novo revestimento deve ter a capacidade de resistir aos sais que eventualmente estejam no suporte.

No que se refere à compatibilidade química, destacam-se as características relacionadas com o comportamento dos sais:

- limitação do teor em sais solúveis dos novos materiais;
- resistência a sais solúveis geralmente existentes nas paredes.

As argamassas não devem conter altos teores em sais solúveis uma vez que estes poderão ter uma acção bastante destrutiva sobre as alvenarias [Penas, 2008; Veiga *et al*, 2002b].

A degradação causada pelos sais solúveis resulta, na sua maioria, da secagem dos elementos construtivos. A evaporação da água provoca a cristalização dos sais que nela se encontram dissolvidos, daí resultando eflorescências (se a cristalização ocorrer na superfície dos elementos) ou criptoflorescências (se a cristalização ocorrer no interior dos poros dos materiais de construção). A degradação pode ser causada também pela

hidratação dos cristais. A deterioração inicia-se à superfície dos elementos construtivos, progredindo para o interior com o desaparecimento das camadas superficiais. Os materiais dos revestimentos, nomeadamente os das paredes, são aqueles que mais frequentemente são afectados pela acção dos sais [Gonçalves, 2002].

A resistência aos sais solúveis existentes nas paredes antigas é difícil de quantificar, já que é necessário que as argamassas não sejam facilmente degradáveis pelos sais e também que não obriguem à sua cristalização no interior das alvenarias. Tal seria pior por contrariar o princípio da conservação dos elementos antigos. Apesar das argamassas com boa resistência mecânica resistirem melhor aos sais, em geral, do que as mais fracas, elas podem não ser adequadas, por contribuírem para o aumento da cristalização dos sais na alvenaria [Veiga *et al*, 2002b].

d) Compatibilidade geométrica

A compatibilidade geométrica traduz-se na capacidade de adesão do reboco à superfície do suporte, que em reabilitação geralmente é irregular e descontínua. A adesão do reboco é condicionada pela quantidade de água existente, pelo teor de materiais finos e pelo coeficiente de absorção do suporte. É sempre aconselhável recorrer a uma espessura de revestimento suficiente para garantir ao suporte planeza e verticalidade [Penas, 2008].

Veiga e Carvalho [Veiga *et al*, 2002b], após vários estudos neste domínio, propuseram alguns valores para as características mecânicas a que as argamassas utilizadas em rebocos de substituição devem respeitar (Tabela 2.1).

Tabela 2.1– Requisitos mínimos de argamassas de revestimento para edifícios antigos (adaptado de [Veiga *et al*, 2002b]).

Argamassa	Características mecânicas aos 90 dias (MPa)			Aderência aos 90 dias (MPa)	Comportamento à água Ensaio clássico	
	Resistência à tracção	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade		Espessura da camada de ar de difusão equivalente ⁽¹⁾	Coef. de capilaridade
	Rt	Rc	E		SD (m)	C (kg/m ² .h ^{1/2})
Reboco exterior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000-5000	0,1 - 0,3 ou com rotura coesiva pelo reboco	<0,08	8-12
Reboco interior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000-5000	0,1 - 0,3 ou com rotura coesiva pelo reboco	<0,10	-
Juntas	0,4 – 0,8	0,6 – 3,0	3000-6000	0,1 - 0,5 ou com rotura coesiva pela argamassa	<0,10	8-12

⁽¹⁾ Valor relacionado com a permanência ao vapor de água

No capítulo relativo à análise dos resultados, os valores apresentados na tabela 2.1 irão ser comparados com os resultados obtidos, de modo a analisar a adequação das argamassas estudadas para argamassas de consolidação.

2.2.3 Patologias de rebocos antigos

Os revestimentos desempenham um papel relevante na durabilidade das alvenarias dos edifícios, já que constituem a “pele” dos mesmos contra as acções agressivas de natureza física, mecânica, química ou biológica. Sendo elementos susceptíveis de degradação, necessitam frequentes intervenções de conservação [Magalhães, 2002].

Podem considerar-se seis as anomalias mais correntes em rebocos:

2.2.3.1 Anomalias provocadas pela Humidade

O conhecimento das formas de manifestação das anomalias devidas à humidade é essencial para a elaboração de um diagnóstico correcto, que permita identificar as respectivas causas e propor as soluções de reparação adequadas.

Por facilidade de exposição, as formas de manifestação de humidade serão descritas individualmente. A situação ideal de ocorrência de cada um dos tipos de anomalias devidas à humidade não corresponde à maioria dos casos em que aquelas manifestações patológicas se verificam. É frequente que um ou mais tipos de fenómeno apareçam associados, quer por existirem condições propícias para tal, quer porque uns podem ser consequência de outros [Henriques, 1994].

A água é a causa primária para muitas das anomalias.

Entende-se pelo fenómeno patológico *humidade* o aparecimento de um teor em água superior ao desejado num revestimento, seja na sua superfície (acabamento) ou na sua própria massa (reboco), manifestando-se sob a forma de manchas [Magalhães, 2002].

Descrevem-se a seguir as fontes mais comuns de *humidade excessiva* nos edifícios:

a) Humidade de obra ou de construção

A humidade de obra ou de construção tem origem na água empregada na execução e aplicação do revestimento e começa a causar danos a partir do momento em que não lhe é permitida a evaporação através da superfície do material, a fim de que seja encontrado o equilíbrio higrotérmico com o ambiente [Henriques, 1994; Magalhães, 2002].

A humidade de obra como anomalia, ou seja, como origem de outras anomalias, costuma aparecer nas etapas finais da construção, normalmente quando são aplicados os acabamentos sem que antes tenha sido assegurada uma secagem adequada dos suportes sobre os quais foram aplicados [Magalhães, 2002].

Além do apodrecimento de materiais orgânicos aplicados em obra em contacto com outros ainda não completamente secos e do aparecimento de fungos e eflorescências, a humidade

de obra pode ser o ponto de partida dum círculo vicioso em que o elevado teor em água das paredes duma habitação prematuramente ocupada conduz à molhagem completa dos materiais por condensação do vapor de água [Silva, 2003].

b) Humidade do terreno

As paredes dos pisos térreos e caves das edificações podem, por vezes, apresentar problemas específicos provocados pela água do solo. Com efeito, a maioria dos materiais de construção utilizados, quer no presente, quer no passado, têm capilaridades elevadas, dando origem a que a humidade possa migrar através deles. Na ausência de qualquer espécie de barreiras, esta migração pode ocorrer horizontal ou verticalmente, o que se verifica quando se apresentam reunidas as seguintes condições:

- existência de zonas das paredes em contacto com a água do solo;
- existência de materiais com elevada capilaridade nas paredes; e
- inexistência ou deficiente posicionamento de barreiras nas paredes.

A ascensão da água nas paredes, que pode ocorrer até alturas elevadas, é função da porosimetria dos seus materiais constituintes - quanto menor o diâmetro dos poros maior a altura que a água pode atingir - da quantidade de água que está em contacto com a parede e das condições de evaporação da água que para aí tenha migrado [Henriques, 1994].

c) Humidade de precipitação

A chuva, por si só, não constitui uma acção especialmente gravosa para as paredes dos edifícios, desde que o vento não lhe esteja associado. [Henriques, 1994; Magalhães, 2002].

A acção da chuva sobre uma parede pode assumir diversos aspectos. A energia cinética das gotas de água pode provocar penetração directa, sempre que haja incidência dessas gotas em fissuras ou juntas mal vedadas. A acção continuada sobre a parede origina a formação de uma cortina de água que, ao escorrer pela superfície, pode penetrar nela por gravidade, pela sobrepressão causada pelo vento ou por acção da capilaridade dos materiais [Henriques, 1994].

As anomalias devidas à acção da água das chuvas manifestam-se através do aparecimento de manchas de humidade nos paramentos interiores das paredes exteriores, em

correspondência com ocorrências de precipitação. Essas manchas tendem a desaparecer quando cessam os períodos de chuva, não sendo visíveis quando se apresenta tempo seco. Nas zonas que sofreram humedecimento é frequente a ocorrência de bolores, eflorescências e criptoflorescências [Henriques, 1994; Silva 2003].

d) Humidade de condensação

As condensações do vapor de água sobre os paramentos ou no interior dos elementos de construção constituem uma das causas mais vulgares da existência de humidades em edifícios de habitação [Silva, 2003].

As condensações surgem devido ao vapor de água gerado no interior dos edifícios. Com efeito, quando existe na atmosfera uma quantidade de vapor de água próxima da máxima que o ar pode conter à temperatura a que se encontra e, por outro lado a capacidade de ventilação não é suficiente para o remover, este condensa em contacto com as zonas dos paramentos internos da envolvente exterior dos edifícios, primeiro nas partes envidraçadas e, numa fase posterior, nas partes opacas [Henriques, 1994; Magalhães, 2002]. Em geral, considera-se que, se não ocorrerem condensações superficiais, 95% da humidade produzida é evacuada através da renovação do ar e os restantes 5% atravessam as paredes exteriores por difusão, podendo eventualmente provocar condensações no interior dessas paredes [Henriques, 1994].

As condensações de vapor de água no interior das paredes não dão origem, em geral, a distúrbios visíveis. Podem no entanto provocar o apodrecimento de materiais orgânicos, o destaque de materiais [Banfill, 1990], a redução do isolamento térmico dos materiais em cujo interior se dão condensações e o desenvolvimento de fungos em paramentos húmidos [Silva, 2003].

e) Humidade devida a fenómenos de higroscópicos

Muitos dos materiais de construção apresentam na sua constituição sais solúveis em água, o mesmo acontecendo nos solos, especialmente em locais ricos em matérias orgânicas. A existência destes sais no interior das paredes não é muito gravosa. No entanto, se as paredes forem humedecidas os sais dissolvidos acompanharão as migrações da água até às

superfícies onde cristalizarão designadamente sob a forma de eflorescências e criptoflorescências [Henriques, 1994].

Alguns destes sais são higroscópicos, isto é, possuem a propriedade de absorverem humidade do ar, dissolvendo-se quando a humidade do ar está acima de 65-75%, voltando a cristalizar com um considerável aumento de volume quando a humidade relativa baixa desses valores. Desta forma, estes sais são susceptíveis de provocarem não só o humedecimento das superfícies sobre as quais se encontrem mas também de darem origem a fenómenos de degradação, resultantes dos aumentos de volume que acompanham a sua cristalização, em consequência da sucessão de ciclos dissolução-cristalização. Os sais solúveis que se encontram associados, mais frequentemente, à ocorrência de manifestações patológicas são os sulfatos, os carbonatos, os cloretos, os nitratos e os nitritos, dos quais os dois primeiros não são higroscópicos. As anomalias devidas a fenómenos higroscópicos são caracterizadas pelo aparecimento de manchas de humidade em locais com fortes concentrações de sais, eventualmente associadas a degradações dos revestimentos das paredes [Henriques, 1994].

f) Humidade devida a causas fortuitas

São inúmeras as situações de ocorrência de humidades devidas a causas fortuitas, o que torna difícil sistematizar todas as causas possíveis. Nas causas mais frequentes deste tipo de anomalias, destacam-se as que ocorrem de roturas de canalizações, designadamente as de redes de distribuição de águas correntes, de águas pluviais e de esgotos. Outras causas comuns são, as infiltrações nas paredes de água provenientes da cobertura, o entupimento de caleiras, algerozes ou tubos de queda [Henriques, 1994; Magalhães, 2002]. Esta humidade manifesta-se pelo aparecimento de focos pontuais de humidade próximos à origem [Magalhães, 2002].

g) Fendilhação e fissuração

Designa-se por fendilhação qualquer abertura longitudinal que atravessa toda a espessura do reboco, chegando a rompê-lo, tornando possível distinguir bem as duas partes do elemento construtivo [Magalhães, 2002].

A fissuração é definida como toda a abertura longitudinal curta, fina e com desenvolvimento discreto, que afecta somente a parte superficial do reboco ou o seu acabamento (pintura). Contrariamente às fendas, as fissuras possuem abertura mais estreita e nunca atingem os limites dos corpos considerados. Estes tipos de anomalias podem ter diferentes causas, apresentando-se de seguida, de forma sucinta, as mais significativas [Magalhães, 2002].

- i. Causas atribuíveis à constituição do reboco:
 - retracção do reboco;
 - dilatações e contracções higrotérmicas;
 - formação de gelo;
 - deficiente dosagem na execução da argamassa;
 - espessura inadequada do revestimento.
 - ii. Causas atribuíveis ao suporte:
 - fendilhação e deslocamento do suporte;
 - reacções com sais existentes no suporte;
 - absorção excessiva do suporte.
 - iii. Outras causas:
 - concentração de tensões junto a aberturas;
 - corrosão de elementos metálicos: ligadores, canos, redes metálicas
- [Magalhães, 2002].

2.2.3.2 Eflorescências e criptoflorescências

As eflorescências são exsudações de sais minerais mais ou menos solúveis em água e que geralmente cristalizam, em tempo seco, na superfície das paredes de alvenarias e, mais raramente, nas de betão. Por vezes, as formas geométricas dos cristais parecem flores, daí a utilização da palavra “florescência” para designar qualquer tipo de cristalização de sais [Magalhães, 2002; Silva, 2003].

A cristalização dos sais pode dar-se antes de estes chegarem à superfície, em alguma cavidade do próprio material, aparecendo assim a criptoflorescências [Magalhães, 2002; Silva, 2003].

Para que se produza o fenómeno da eflorescência é necessária a existência simultânea de três factores:

- a presença de humidade;
- a existência de sais solúveis nos materiais constituintes do revestimento ou do suporte (tijolos, cal, água de amassadura, agregados, produtos de poluição, etc); e
- por fim, é necessária a existência de pressão hidrostática para proporcionar a migração da solução para a superfície.

A variação da temperatura, a evaporação de água e a diminuição da humidade relativa do ambiente são factores que podem conduzir a um aumento na concentração da solução e consequentemente favorecer a cristalização dos sais [Magalhães, 2002; Silva, 2003].

Para o desencadeamento do processo patológico é importante a porosidade do material, bem como o seu coeficiente de absorção, já que estas características facilitam a quantidade de água que atravessa o material, que faz com que acelere ou atrase o aparecimento da anomalia [Magalhães, 2002; Silva, 2003].

Podem tipificar-se as eflorescências em função do tipo de sal que cristaliza. Tem-se então as que são compostas por:

- carbonatos (cálcio, magnésio);
- sulfatos (cálcio, magnésio, potássio, sódio);
- cloretos (cálcio, magnésio, potássio);
- nitratos (potássio, sódio e amónio).

A dissolução e cristalização de cal não-carbonatada existente nos revestimentos ou nos materiais de suporte constituem um caso particular muito frequente de eflorescência [Magalhães, 2002].

2.2.3.3 Biodeterioração

Em geral, todos os microrganismos e organismos são capazes de atacar e degradar os materiais. Podemos reunir neste tipo de anomalia todos aqueles organismos ou microrganismos vivos, animais e vegetais – algas, musgos, líquenes, fungos, plantas

diversas e animais de porte - que de alguma forma deterioram as superfícies dos revestimentos, quer pela sua simples presença quer pelo ataque dos mesmos ou dos produtos químicos que expõem [Magalhães, 2002].

Para que a adesão dos microrganismos às superfícies do revestimento (fendas, fissuras e vazios aí existentes) seja favorecida é necessário que se verifiquem algumas condicionantes físico-químicas e ambientais das quais se destacam: o pH do suporte, a humidade, a temperatura, a iluminação, o oxigénio, entre outras. As principais causas que favorecem a ocorrência deste tipo de anomalia são:

- presença prolongada de humidade;
- falta de ventilação;
- iluminação;
- acumulação de pó, terra e sujidade na superfície do revestimento;
- acumulação de poluentes resultantes da actividade industrial (óxido de nitrogénio, óxido de enxofre, derivados do petróleo, etc);
- porosidade elevada do revestimento [Magalhães, 2002].

I. Perda de aderência (deslocamento, abaulamento, destacamento)

A perda de aderência entre o reboco e o suporte ao qual foi aplicado ou entre as camadas de rebocos pode manifestar-se em três fases distintas: descolamentos, abaulamento ou destacamento da camada de reboco [Magalhães, 2002].

Esta anomalia representa o final da vida útil do reboco, dado que: a) deixa de cumprir a sua função de protecção do suporte – que, deste modo, fica exposto à acção directa dos elementos atmosféricos; b) existe um risco afectivo para a segurança dos utentes decorrente da queda de partes da argamassa; c) com a deterioração do reboco, ocorre a degradação da qualidade visual da fachada como um todo e do meio onde se insere [Gaspar *et al*, 2007].

O deslocamento caracteriza-se pelo afastamento do reboco ao seu suporte (paramento ou camada subjacente), possível de ser identificado através do som cavo que emite quando percutido. Nestes casos, é a tensão superficial da argamassa que a mantém coesa [Gaspar *et al*, 2007; Magalhães, 2002]. Se para além do afastamento do reboco se torna perceptível a

formação de convexidades na superfície duma ou de outra área do reboco, identifica-se essa anomalia como abaulamento do reboco. O destacamento traduz-se na separação definitiva do reboco ao seu suporte e torna-se perfeitamente visível a sua ausência no conjunto de uma fachada [Magalhães, 2002]. Nestas situações, devido ao efeito da gravidade e às deformações do material, originam-se fracturas na argamassa por incapacidade de funcionamento aos esforços de flexão e torção que se criam na camada rígida do revestimento, particularmente nos casos de ocorrência de abaulamentos do reboco. Em consequência o reboco, cai sob a forma de placas rígidas de geometria irregular. Ao contrário do que acontece no caso das fissurações ou manchas, verifica-se que os destacamentos raramente ocorrem de forma isolada, mas resultam de estados patológicos por vezes complexos [Gaspar *et al*, 2007].

Nas argamassas de cal, o processo de degradação por perda de aderência pode ser precedido de fendilhação na zona afectada. Nestas situações, verifica-se muitas vezes o destacamento da camada de acabamento do reboco (esboço), mais rígida do que as camadas precedentes devido a uma carbonatação mais prolongada dos seus constituintes. A perda desta camada deixa exposta aos agentes atmosféricos a camada de emboco, geralmente de maior espessura e menos rígida, logo mais susceptível a degradação por perda de coesão, como se ilustra na Figura 2.1 [Gaspar *et al*, 2007].

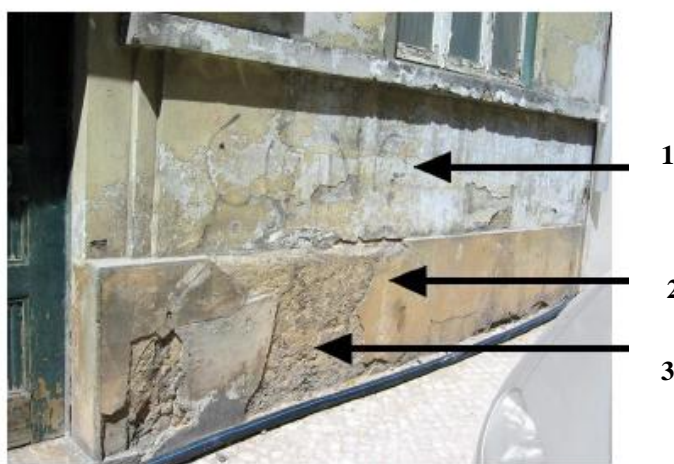


Figura 2.1 – Fases de degradação por perda de material em argamassas de cal: inicialmente, dá-se a fissuração da argamassa (1), conduzindo ao descolamento e desprendimento da camada de acabamento, mais carbonatada e mais rígida (2), as camadas interiores do reboco ficam expostas e sujeitas a fenómenos de perda de coesão e de lavagem dos constituintes da argamassa (3) [Gaspar *et al*, 2007].

A perda de aderência pode ocorrer por descolamento em relação à base de assentamento ou por retração da argamassa que origina a rotura por corte relativamente ao suporte. As principais causas para o aparecimento deste tipo de anomalia são [Gaspar *et al*, 2007]:

- presença de humidade prolongada na parede;
- presença de sais infiltrados na zona de interface;
- dilatações e contracções térmicas (variações dimensionais do reboco);
- movimentos diferenciais entre o suporte e o revestimento;
- erros de execução do revestimento;
- deficiente aderência da argamassa ao suporte devido a uma má cura daquela na fase de aplicação, conduzindo a: a) uma dessecação do suporte e a criação de uma superfície pulverulenta entre a argamassa e a base de assentamento; b) salpisco mal hidratado ou, inversamente; c) excesso de água de amassadura;
- deficiente preparação do suporte: falta de rugosidade do suporte ou de limpeza (por vezes decorre da aplicação de um revestimento sobre outro existente);
- elevada impermeabilidade à água do suporte;
- insuficiente permeabilidade ao vapor de água do revestimento.
- espessura excessiva do reboco;
- aplicação de rebocos demasiado rígidos sobre suportes não homogéneos ou constituídos por camadas, com menor capacidade de aderência entre si e que são “arrancadas” à própria parede;
- dosagem inapropriada do traço da argamassa (pouco ligante), sobretudo quando conjugada com a aplicação em tempo seco [Gaspar *et al*, 2007; Magalhães, 2002].

Por sua vez, o destacamento (ou abaulamento) pode dever-se a:

- deformações do suporte, especialmente devidas ao aumento de volume de elementos metálicos, por corrosão dos mesmos;
- ocorrência de tensões de corte na argamassa ou na interface entre esta e o suporte;

- uma combinação das causas mencionadas anteriormente que conduz ao agravamento das situações de descolamento e deformação da argamassa [Gaspar *et al*, 2007].

2.2.3.4 Perda de coesão ou desagregação

Este fenómeno consiste na desunião dos componentes do reboco seguida por uma considerável perda das partículas que o compõem, convertendo-o num material frágil e susceptível à degradação [Magalhães, 2002]. A perda de coesão é mais frequente em argamassas antigas, por oposição às argamassas de cimento, sobretudo após o destacamento da camada superficial do reboco (mais endurecida e que, ao desaparecer, deixa expostas ao ambiente as camadas interiores do reboco). A perda de coesão manifesta-se geralmente por três tipos de fenómenos [Gaspar *et al*, 2007]:

- Pulverização (Figura 2.2a): desagregação dos vários componentes da argamassa, que se esfarela e conduz ao desprendimento de material sob a forma de pó ou grânulos;
- Arenização ou desagregação granular (Figura 2.2b): perda ou lavagem das partículas finas da argamassa caracterizada pelo fácil destaque de partículas de dimensão semelhante à areia, mesmo com esforços mecânicos de fraca intensidade;
- Erosão (Figura 2.2c): corresponde à perda localizada de massa de superfície do material por acção dos elementos atmosféricos, podendo originar um efeito localizado da escavação da argamassa. Este fenómeno, raro, acontece geralmente após perda da camada exterior de protecção (como a cal).



Figura 2.2- Da esquerda para a direita, exemplos de pulverização, de arenização e de erosão.

As causas mais prováveis para este tipo de anomalia são:

- humidade seguida de cristalização de sais;
- reboco fraco, sem dureza superficial;
- acção de microrganismos e organismos;
- reacção química entre os materiais que constituem os revestimentos e os compostos naturais ou artificiais (poluição) contidos na atmosfera.

2.2.3.5 Erosão

Engloba de uma forma geral a destruição ou desgaste do reboco, implicando perda de material ou, unicamente, a alteração da superfície do reboco, sem necessariamente haver desaparecimento de parte do material, mas apenas modificação do seu aspecto ou textura exterior. Estes fenómenos resultam da acção erosiva de agentes químicos, mecânicos ou físicos [Magalhães, 2002].

As causas mais prováveis para este tipo de anomalia são:

- humidade;
- esforços mecânicos de natureza diversa (atritos, golpes, etc.);
- acções físicas dos agentes atmosféricos (vento, chuva, variação de temperatura);
- perda de coesão.

2.2.3.6 Sujidade

A sujidade, especialmente originada pela poluição, é uma anomalia muito comum e grave [Aguar, 200b; Magalhães, 2002]. A deposição de diversos componentes estranhos

(sulfatos e alguns sais, ferro e partículas carbonosas) pode originar a formação de crostas e, posteriormente, causar apreciáveis degradações de onerosa resolução [Aguiar, 200b].

As causas mais prováveis para este tipo de anomalia podem ser:

- escoamento da água da chuva.
- acção do vento.
- textura superficial do reboco (rugosidade) [Magalhães, 2002].

2.3 Argamassas de revestimentos

As argamassas de revestimento devem proteger a parede da acção da água, da acção directa dos agentes climáticos, de acções mecânicas de choque e erosão, da acção química da poluição e dos sais solúveis contidos nos materiais, na água e no solo [Veiga, 2002b].

As primeiras argamassas foram descobertas na localidade *Yftah'el*, Galileia, hoje estado de Israel, com mais de dez mil anos de existência. Em Jericó (8000-7000 a. C.) denota-se a presença de cal e gesso nas construções e nas cabeças de estátuas votivas modeladas e na Turquia usou-se gesso como reboco de paredes. Mais tarde foram encontradas nas cisternas de Jerusalém argamassas de cal hidráulica. A fabricação da cal era familiar à maioria dos povos da antiguidade, que produziam cal gorda, utilizando-a como ligante na consolidação das alvenarias ou na elaboração de rebocos pintados com cores naturais. Ao longo dos tempos, o processo da produção da cal foi evoluindo e, hoje, uma parte significativa das argamassas utilizadas na construção é produzida em fábrica [Alvarez, 2005].

Os romanos começaram a adicionar pozolanas às argamassas de cal. A adição deste material implicava uma melhoria das características dos rebocos assim produzidos. Os materiais pozolânicos combinam-se com a cal não carbonatada, hidróxido de cálcio, para formar compostos estáveis, nomeadamente silicatos de cálcio. As pozolanas têm um comportamento inerte na ausência de água. Todavia, quando se introduz água numa mistura de pozolana e cal, a cal não carbonatada (CaO) reage com a água, formando hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Por outro lado, as pozolanas que na sua constituição têm alumina, sílica e cálcio, reagem com o hidróxido de cálcio formando silicatos de cálcio, os

quais, devido à sua estabilidade permitem uma maior resistência mecânica da argamassa e redução da sua porosidade [Alvarez, 2005].

Mais tarde o engenheiro e cientista francês *Vicat* (1786-1861) percebe que a cozedura de calcários silíciosos provoca a dissolução dos ácidos e a sua combinação com a cal, conferindo à argamassa propriedades hidráulicas, que lhe permitem fazer presa debaixo de água. *Vicat* demonstrou que a cal hidráulica tem origem em calcários argilosos e que não era obrigatório que a argila estivesse na composição original do calcário, uma vez que poderia ser adicionada antes da cozedura. E assim, se começou a produzir cal hidráulica artificial. O fabrico da cal hidráulica melhorou com a utilização de fornos que podiam atingir temperaturas de cerca de 1000°C, calcinando a temperaturas mais elevadas e melhorando-se os níveis de hidraulicidade [Alvarez, 2005].

Em 1825, *Aspdin* coze o seu primeiro cimento no forno construído por ele e pelo seu filho, *Kirgate*. O segredo foi bem guardado, mas não era mais do que um novo processo de aquecimento dos fornos, que lhes permitia obter temperaturas mais elevadas e portanto, obterem no seu processo de cozedura, uma *clinkerização*. Em 1853, o cimento *Portland* artificial que fora exclusivamente produzido em Inglaterra, passava a ser fabricado também em França [Alvarez, 2005].

O mercado de cal hidráulica confrontou-se com o cimenteiro e nos anos seguintes o resultado desse confronto pendeu para os fabricantes do cimento *Portland*, dadas as características deste produto e devido ao incremento de vendas de betão [Alvarez, 2005].

Após instalação da indústria cimenteira em Portugal no princípio do século XIX, o cimento *Portland* passa a ser o ligante mais usado, substituindo a cal hidráulica e a cal hidratada [Alvarez, 2005].

Esta opção por um único ligante hidráulico veio a constatar-se que trazia alguns inconvenientes, aos rebocos, tornando-os mais fissuráveis, dado o comportamento das argilas perante a água. O abuso da percentagem de cimento no traço da argamassa, situação muito frequente em obra, teve como consequência uma retracção ainda mais acentuada dos rebocos e consequente fissuração [Alvarez, 2005].

Tendo em vista a obtenção de um revestimento adequado para edifícios antigos, com um bom comportamento e baixo custo, em vários países estão a desenvolver-se estudos que possibilitam o reaparecimento da cal hidráulica e da cal aérea como ligantes únicos ou misturados um com o outro. Em Portugal também se tem em vista um maior uso destes materiais, tendo em consideração as exigências e as técnicas actualmente aplicadas.

2.3.1 Ligantes

Os ligantes são pós muito finos que ao serem amassados com água formam uma pasta cujo endurecimento se dá apenas pela reacção química entre o pó e a água e o ar.

A designação de ligantes advém da propriedade que têm de aglomerar uma proporção elevada de materiais inertes, como areias, gados, pedra britada, etc., conferindo ao conjunto grande coesão e resistência [Coutinho, 1998].

Os ligantes podem ser hidráulicos ou aéreos. Os primeiros, para além de endurecerem ao ar, são capazes de adquirir elevadas resistências debaixo de água. Os ligantes aéreos, não podem passar ao estado sólido dentro de água. O seu endurecimento faz-se pela acção do anidrido carbónico da atmosfera que os transforma em carbonatos. Há uma terceira categoria de ligantes, de natureza orgânica, como os hidrocarbonetos e as resinas sintéticas. Estes últimos estão numa fase de franco desenvolvimento [Coutinho, 1998].

A cal aérea é um ligante histórico nas formulações clássicas das argamassas utilizadas ao longo do tempo e a hidraulicidade necessária era obtida genericamente pela introdução de elementos de reacção pozolânica [Sequeira *et al*, 2007].

As cais podem ser classificadas de acordo com a matéria-prima de origem. A presa das argamassas à base de cal e o seu endurecimento são lentos, em função do grau de hidraulicidade da cal, que está directamente ligado ao seu teor em argila e que, por sua vez, é definido pelo índice de hidraulicidade. Na tabela seguinte, tabela 2.2, é apresentada uma possível classificação das cais [Faria, 2004].

Tabela 2.2- Classificação da natureza da cal de acordo com a matéria-prima.

Natureza da cal	Teor em argila	Índice de hidraulicidade	Tempo de presa
	%	CaO/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	Dias
Cal aérea gorda	<1	-	-
Cal aérea magra	1 a 5	-	-
Cal fracamente hidráulica	5,3 a 8,2	10 a 6,2	16 a 30
Cal medianamente hidráulica	8,2 a 14,8	6,2 a 3,1	10 a 15
Cal hidráulica	14,8 a 19,1	3,1 a 2,4	5 a 9
Cal eminentemente hidráulica	19,1 a 21,8	2,4 a 2,0	2 a 4
Cal limite ou cimento de presa lenta	21,8 a 26,7	2,0 a 1,5	1
Cimento de presa rápida	26,7 a 40	1,5 a 0,8	-

2.3.1.1 Cal aérea

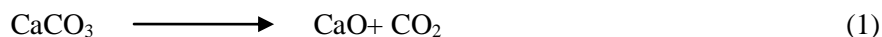
Segundo a norma NP EN459-1 [15], a cal aérea é principalmente constituída por óxidos ou hidróxidos de cal que, amassados com água, lentamente endurecem ao ar, reagindo com o dióxido de carbono da atmosfera; não endurecem debaixo de água por não terem propriedades hidráulicas [Faria, 2004; IPQ, 2002].

A cal aérea é o ligante que resulta da decomposição, pela acção da temperatura, de uma rocha com percentagem não inferior a 95% de carbonato de cálcio – rocha cálcica CaCO₃ - ou carbonato de cálcio e magnésio – rocha dolomítica CaMg(CO₃)₂ – na sua composição. Do processamento da rocha dolomítica (com teor em óxido de magnésio superior a 20%) resulta a cal aérea dolomítica ou magnesiana, enquanto, a partir da rocha cálcica se desenvolve a cal cálcica [Coutinho, 1998; Faria, 2004].

De acordo com as condições de fornecimento, a cal aérea é classificada em cal viva ou cal hidratada. Quanto ao teor de impurezas, a cal aérea divide-se em gorda ou magra. A cal aérea gorda deriva de calcários quase puros, com teores de carbonatos não inferiores a 99% e são brancas, a cal aérea magra (acinzentada) deriva de calcários com teores de argila e outras impurezas compreendidos entre 1 a 5% [Coutinho, 1998; Coutinho, 2006; Faria, 2004; IPQ, 2002].

Calcinação

Na presença de temperaturas aproximadamente de 900°C, o carbonato de cálcio da rocha (CaCO_3) decompõe-se em dióxido de carbono (CO_2), que é libertado no ar, e em óxido de cálcio (CaO), vulgarmente designado por cal viva (Eq.1).

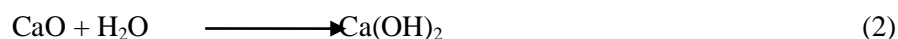


De acordo com a NP EN459-1, a cal viva é a cal aérea que consiste em óxido de cálcio ou (magnésio) produzido pela calcinação da rocha calcária (ou dolomítica) e que produzem uma reacção endotérmica quando em contacto com a água, podendo surgir desde a forma de pedra até pó fino (cal viva micronizada). A aparência da rocha e do produto que se obtém da calcinação não são muito diferentes, mas as suas características transformam-se por completo [IPQ, 2002; Ribeiro, 2002].

O óxido de cálcio é um produto sólido, geralmente de cor branca (dependendo da pureza do calcário de partida), com uma massa específica situada entre 3,30 e 3,98 g/cm³ e com muita afinidade pela água.

Hidratação

A cal viva é um produto muito instável, pelo que necessita de ser hidratada. Esta hidratação é designada por extinção da cal viva e pode desenvolver-se por imersão ou aspersão com água. Em presença de água, o óxido de cálcio transforma-se em hidróxido de cálcio (reacção fortemente exotérmica), por fragmentação:



O hidróxido de cálcio resultante é vulgarmente designado por cal apagada, cal extinta ou cal hidratada. Na extinção da cal processa-se uma desagregação com efervescência e produção de calor, libertação de vapores cáusticos e aumento de volume. A cal cálcica começa a desagregar-se quase imediatamente após o contacto com a água. A extinção da cal é tanto mais difícil quanto mais elevada for a temperatura à qual a rocha original foi cozida [IPQ, 2002; Ribeiro, 2002].

Carbonatação

A cal hidratada (hidróxido de cálcio ou portlandite – no caso de cal hidratada corrente), endurece lentamente em contacto com o ar segundo uma reacção de carbonatação. Esse endurecimento é devido a uma evaporação da água e a uma carbonatação por absorção do anidrido carbónico do ar, formando-se de novo o carbonato de cálcio.



Durante a secagem da pasta de cal pura constata-se a ocorrência de uma construção com fissuração, pelo que é necessário usar areia (ou pó de pedra, aquando da aplicação em camadas delgadas) nas argamassas, material que diminui a retracção do produto, dividindo-o numa enorme quantidade de pequenas fracções localizadas que arejam a argamassa, permitindo a sua carbonatação, ao mesmo tempo que se dá a secagem. Como o endurecimento se dá com libertação de água, nas argamassas deve-se introduzir a menor quantidade de água possível [Faria, 2004; Ribeiro *et al*, 2002].

Segundo *Van Balen* [Van Balen *et al*, 1994], o processo de carbonatação pode ser dividido num processo de difusão de dióxido de carbono seguido por uma reacção química em que se formam cristais de carbonato de cálcio. A deposição de cristais de carbonato de cálcio durante a carbonatação altera a estrutura porosa da argamassa e influencia as suas propriedades higroscópicas. A lenta carbonatação da cal tem implicações nas propriedades mecânicas da argamassa de cal e das alvenarias com ela executadas, ao longo do tempo. A velocidade de carbonatação é influenciada pela presença de humidade na argamassa.

A difusão do dióxido de carbono na água é muito mais lenta do que no ar, pelo que a carbonatação é retardada quando o material está saturado em água. O teor em água óptimo para a carbonatação será o que corresponde à máxima absorção na superfície dos poros antes da condensação capilar e tem um papel importante na difusão do dióxido de carbono na argamassa de cal [Faria, 2004].

A evolução da carbonatação depende da quantidade de cal que tem que reagir com o dióxido de carbono que se difunde através do material. É necessária uma quantidade mínima de água na qual o dióxido de carbono se vai dissolver. A solubilidade do dióxido de carbono na água reduz-se para um quarto quando a sua temperatura aumenta de 15 para 60°C, sendo cerca de 20°C a temperatura que optimiza a carbonatação [Faria, 2004].

A carbonatação dá-se com uma diminuição do volume dos poros, segundo Moorhead [Moorhead, 1986], a uma porosidade de 42% antes da carbonatação corresponderá a 37% após carbonatação. O aumento de volume ocorre no interior dos poros e a microestrutura vai-se alterando. Os poros de maior diâmetro são preenchidos com carbonato de cálcio microcristalino ou amorfo, que se expande, sem alteração detectável no volume da argamassa, mas o produto torna-se menos permeável, nomeadamente ao dióxido de carbono, à medida que a reacção prossegue.

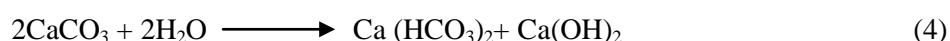
O calor produzido evapora a água produzida pela reacção e a água livre ou capilar existente. A reacção poderá terminar prematuramente, antes de toda a cal hidratada ter carbonatado, uma vez que a água é necessária como veículo de transporte do dióxido de carbono.

Para que a velocidade de carbonatação seja optimizada, cerca de 50% do volume dos poros deve estar preenchido com água - os capilares mais finos ficam cheios de água e os mais largos permanecem disponíveis para a difusão do dióxido de carbono para o interior e para a dissipação do vapor de água. Assim, quanto mais espessa for a camada de argamassa, maior distância o dióxido de carbono tem que viajar para entrar em contacto com o hidróxido de cálcio que ainda não carbonatou (a carbonatação efectua-se de fora para dentro). As argamassas com elevados teores em cal hidratada carbonatam mais lentamente, por existir mais hidróxido de cálcio disponível num mesmo volume e levar mais tempo a que se transforme em carbonatos. A velocidade de carbonatação é afectada pelo teor em água e pelo teor em cal hidratada da argamassa, permeabilidade ao vapor de água, temperatura, concentração de dióxido de carbono, espessura de argamassa e humidade relativa ambiente [Moorhead, 1986].

Em condições reais é, por vezes mais difícil, conseguir atingir as situações ideais anteriormente descritas, uma vez que a conversão do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio decorre muito lentamente. Por vezes essa conversão é muito incompleta, pelo que, num período após a construção, por vezes durante séculos, quantidades significativas de hidróxido de cálcio permanecem quimicamente livres em vários elementos de construção [Faria, 2004].

Formação de bicarbonatos

Em presença intensa e constante de água, o carbonato de cálcio transforma-se em bicarbonato de cálcio, que é solúvel em água. Na figura 2.3 pode-se ver o aspecto da rocha de calcite. Em situações em que as argamassas estejam praticamente imersas em água ou em que se verifiquem ciclos de molhagem muito superiores aos da secagem, pode ocorrer uma lavagem do ligante das argamassas. Quando a argamassa torna a ficar seca, o hidróxido de cálcio volta a absorver o dióxido de carbono do ar e volta a carbonatar-se, como se verifica na (eq.4).



A formação do bicarbonato de cálcio resultante da carbonatação, quimicamente semelhante ao material de partida – rocha calcária – tem propriedades substancialmente diferentes da rocha original, devido à diferente organização mineralógica dos seus cristais [Margalha, 2008].



Figura 2.3 - Imagens da rocha calcite (CaCO_3).

2.3.2 Agregados

Agregado é um material constituído por partículas com uma extensa gama de tamanhos, incoesivo, de actividade química praticamente nula.

Os agregados são constituintes praticamente inertes na formulação das argamassas e podem ser classificados segundo a origem, as dimensões das partículas e o peso específico aparente [Illston, 2005].

Segundo a origem, os agregados são classificados por:

- naturais – são os que se encontram com a sua forma na natureza: a areia e o cascalho;
- industrializados – são os que têm composição “particulada” obtida por processos industriais. Nestas situações a matéria-prima pode ser: rocha, escórias de alto-forno, entre outras;
- reciclados – são os que resultam do processamento de material orgânico anteriormente usado na construção.

Segundo as dimensões das partículas, os agregados são classificados por:

- fino: são as areias, naturais ou britadas, com partículas que passam ao peneiro de 4mm;
- grosso: são o godo, de origem sedimentar, o rolado, o calhau ou o seixo e as britas (que não são usadas nas argamassas).

Segundo o peso específico aparente, os agregados são classificados conforme a densidade do material que constitui as partículas, os agregados são classificados em leves, médios ou normais e pesados [Illston, 2005].

A areia funciona como esqueleto da argamassa que ganha coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante, sendo a qualidade do agregado fundamental no comportamento global da pasta. A mistura da areia separa as partículas de cal, o que facilita a reacção química da carbonatação e, por outro lado, permite distribuir as retracções que eventualmente ocorram por toda a massa. Existem factores, como a dureza, a forma dos grãos, a granulometria e a porosidade, que afectam as características das argamassas. A sua origem e o estado de limpeza da areia são factores que também podem alterar as características da argamassa. Uma areia bem graduada, com menor volume de vazios, é adequada. As areias com maior volume de vazios afectam a estrutura porosa da argamassa e exigem, naturalmente, traços mais ricos em ligante. O aumento da quantidade de cal pode ter consequências negativas ao nível da retracção [Margalha, 2006].

As areias provêm da desagregação das rochas, pelo que do ponto de vista químico se podem distinguir dois grupos principais: areias siliciosas (quartzosas e graníticas) e areias calcárias. Enquanto as areias siliciosas são geralmente dos rios ou dos areiros, as areias

calcárias resultam de desperdícios de pedreiras de rocha calcária. As areias podem conter uma maior ou menor quantidade de argila, sendo geralmente designada por areia amarela a areia de areeiro com algum teor em argila. As areias conferem uma maior trabalhabilidade e maiores resistências mecânicas às argamassas, devido às partículas finas da argila, mas a sua utilização (com uma quantidade elevada de argila) pode conduzir à redução da ligação do agregado com cal e conduzir à necessidade de adição de uma maior quantidade de água na argamassa, o que incrementa o fenómeno de retracção. A presença da argila na fracção fina das areias poderá também afectar a durabilidade e a retracção das argamassas, pelo que pode definir-se um valor limite para o teor em argila de um agregado [Faria, 2004].

2.3.3 Água da amassadura

A água da amassadura deve ser controlada de modo a conduzir a uma argamassa bastante consistente. Embora se torne mais difícil a aplicação de uma argamassa mais consistente, estas resultam num revestimento mais compacto, com maior resistência, menor tendência para fissurar e menor permeabilidade à água [Veiga, 2006].

A água da amassadura permite a hidratação do ligante, possibilitando a aglomeração dos constituintes e a constituição de uma pasta. Confere trabalhabilidade à argamassa, condicionando a aderência ao suporte e o rendimento da mão-de-obra. A quantidade de água utilizada na amassadura aparece em função de vários factores: tipo de ligante, traço da argamassa, granulometria da areia e da água presente no próprio agregado. O seu excesso poderá conduzir a um aumento da retracção de secagem e porosidade do revestimento [Penas, 2008].

2.3.4 Adjuvantes

A utilização dos adjuvantes é tão antiga como a do próprio cimento, ou dos ligantes hidráulicos. Os romanos já utilizavam o sangue, a clara de ovo, a banha e o leite como adjuvantes, com a finalidade de melhorar a trabalhabilidade.

Designa-se como adjuvante a substância utilizada em quantidade não superior a 10% da massa do ligante adicionada, durante a amassadura, aos componentes normais das argamassas, com o fim de modificar certas propriedades destes materiais, quer no estado fluído, quer no estado sólido, quer ainda no momento da passagem dum estado para outro.

Os adjuvantes podem classificar-se de acordo com a sua acção principal [Coutinho, 1998]:

- a) reologia das argamassas e betões frescos;
- b) teor em ar das argamassas e betões;
- c) presa e endurecimento;
- d) expansão;
- e) resistência a acções físicas;
- f) resistência a acções químicas;
- g) resistência a acções biológicas;
- h) cor.

Os efeitos que se pretendem alcançar com a adição de adjuvantes são [Coutinho, 1998]:

- 1. melhorar a trabalhabilidade;
- 2. acelerar a presa;
- 3. retardar a presa;
- 4. acelerar o endurecimento nas primeiras idades;
- 5. aumentar as tensões de rotura pelo menos nos primeiros meses;
- 6. aumentar as resistências aos ciclos de congelação e descongelação;
- 7. diminuir a permeabilidade aos líquidos;
- 8. impedir a segregação e a sedimentação do cimento nas caldas de injeção;
- 9. criar uma ligeira expansão nas argamassas ou betões;
- 10. aumentar a aderência ao inerte e às argamassas e betões endurecidos;
- 11. produzir argamassas ou betões coloridos;
- 12. produzir argamassa leve, celular;
- 13. produzir propriedades fungicidas, germicidas e insecticidas;
- 14. inibir a corrosão das armaduras;
- 15. ajudar a bombagem dos betões pobres.

Os adjuvantes mais utilizados são os agentes redutores de água ou plastificantes, os agentes adesivos e os agentes retentores de água, os quais são superficialmente activos e associados às interfaces líquido-ar e líquido-líquido, contribuindo para fenómenos de orientação e adsorção [Seabra *et al*, 2007].

2.3.4.1 Agentes redutores da água de amassadura (plastificantes)

Os adjuvantes redutores da água de amassadura (plastificantes) pertencem a uma categoria de substâncias designadas por tensioactivas. Estas substâncias possuem propriedades físico-químicas de modificarem a tensão superficial do solvente (neste caso a água). As suas moléculas apresentam-se alongadas e têm uma parte hidrófila e outra hidrófoba [9].

A extremidade hidrófila é formada por grupos hidroxicarboxílicos ($-\text{COOH}$), por sais destes ácidos, como carboxilatos de sódio ($-\text{COONa}$), cálcio, etc, por grupos do ácido sulfónico ($-\text{SO}_3\text{H}$) ou por sais deste ácido, como sulfonatos de sódio ($-\text{SO}_3\text{Na}$), de cálcio, entre outros. A extremidade hidrófoba pode ser constituída por uma cadeia alquílica simples ou ramificada, contendo grupos benzénicos, linhossulfónicos, naftalénicos, metamínicos e outros [Coutinho, 1998].

Os plastificantes reduzem a quantidade de água da amassadura e fluidificam o material, isto é, possibilitam a diminuição da água da amassadura mantendo a trabalhabilidade desejada ou aumentam esta sem subir a quantidade da água.

O plastificante é assim uma substância constituída por moléculas tensioactivas que compreendem uma parte hidrófila cuja função é baixar a tensão superficial da água na intersuperfície onde está adsorvida.

Quando se mistura uma argamassa e inertes com água, as partículas não ficam todas dispersas no líquido, formando-se associações de grãos com diversas dimensões, que aderem entre si por acção dos meniscos de água provocadas pelo ar que se encontra preso entre os grãos, o que confere uma boa coesão capilar (figura 2.4).

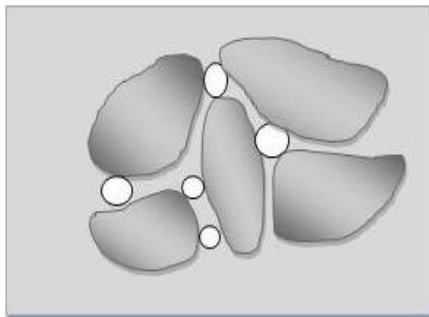


Figura 2.4 - Partículas de argamassa flocladas, aglomeradas pelas tensões capilares devidas à presença de ar e água [9].

As partículas da argamassa quando entram em contacto com a água na qual se dissolveu ou dispersou um plastificante são mais eficientemente molhadas pelo líquido devido à adsorção da parte hidrófoba da molécula de dispersante. A parte ionizada confere à partícula uma carga eléctrica de certo sinal, e o ar presente entre elas é expulso e dando-se a dispersão do material.

As moléculas ficam orientadas à superfície do grão com a parte hidrófoba ligada à superfície do grão e a extremidade líofila bem mergulhada na água, constituindo a camada fixa. Para lá desta camada, tem-se uma segunda constituída pelos iões libertados pela molécula do tensioactivo, formando uma segunda camada de iões de sinal contrário ao da primeira camada. Como as forças de atracção da primeira camada vão diminuindo de intensidade à medida que se afastam da partícula, esta segunda camada é constituída por uma atmosfera de iões cuja concentração vai diminuindo com a distância e por isso denominada por camada difusa. Como a partícula adquire assim um potencial eléctrico negativo (ou positivo, de acordo com a substância adsorvida) cria-se uma repulsão electrostática entre as partículas. Este potencial orientará os dipolos que constituem as moléculas de água à roda das partículas, formando-se uma camada de moléculas de água, que impede a aproximação entre as partículas. Obtém-se assim uma diferença de potencial, potencial electrocinético ou potencial zeta, entre a interface da dupla camada e um ponto qualquer da solução [Coutinho, 1998].

Deste modo, a dispersão e a estabilidade do material é obtida conjugando três factores[9]:

1. redução da tensão intersuperficial;
2. aumento do potencial electrocinético;
3. formação duma camada protectora e aderente de moléculas de água.

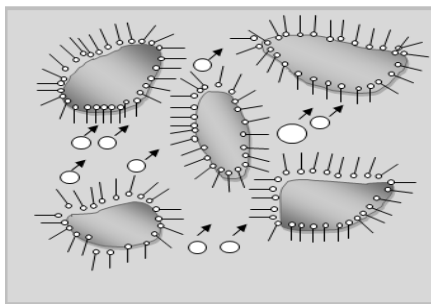


Figura 2.5-Ao adicionar –se um agente plastificante à água, este é adsorvido pela superfície das partículas da argamassa, expulsando o ar [Coutinho, 1998].

Em consequência deste mecanismo, a água que separava os grãos de material, quando não havia dispersante (Figura 2.5), fica agora livre entre as partículas dispersas. Devido à camada das moléculas de água orientadas em redor das partículas, o atrito entre elas é reduzido (Figura 2.6), não sendo necessário para a sua redução a existência de camadas muito espessas de água, o que permitirá uma aproximação entre elas sem que aumente o atrito. Daí a denominação de agentes redutores da água de amassadura a estes adjuvantes [Coutinho, 1998].

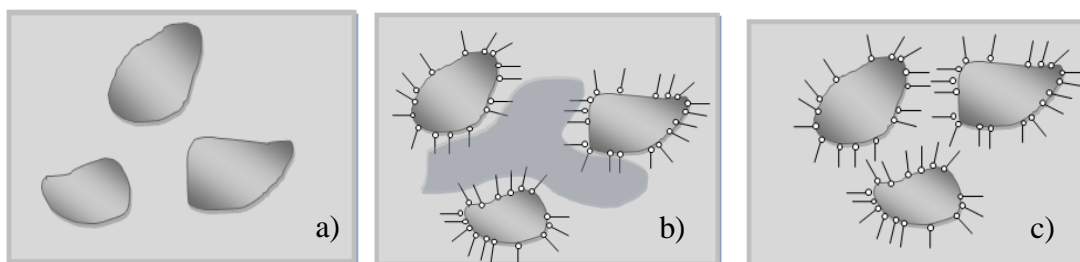


Figura 2.6 - (a) Na ausência de agentes redutores da água da amassadura (plastificantes), a quantidade de água para a mobilidade das partículas é grande. (b) Na presença de agente redutor da água de amassadura (plastificante), as partículas repelem-se e a água que fica livre entre elas não é necessária para a sua mobilidade. (c) A distância entre as partículas reduz-se e a água em excesso pode ser dispensada [Coutinho, 1998].

Os principais efeitos secundários dos plastificantes são o retardamento da presa e uma redução das resistências iniciais. Os produtos mais utilizados como plastificantes são os linhossulfonatos, os polihidroxílicos e as resinas abiéticas alcalinas. [Coutinho, 1998; Illston *et al*, 2005].

2.3.4.2 Superplastificantes

Como o próprio nome indica os superplastificantes são mais poderosos do que os plastificantes e são usados para aumentar a fluidez e a trabalhabilidade numa maior amplitude do que os plastificantes [Illston *et al*, 2005]. O mecanismo da sua acção é idêntico ao dos plastificantes mas é mais intenso embora muito menos durável [Coutinho, 1998].

O aumento das dosagens de plastificante é indesejável, pois pode dificultar as reacções de hidratação da cal e comprometer o endurecimento do material. Daí se usarem os superplastificantes para se ultrapassar esta limitação. Estes podem ser utilizados com dosagens superiores permitindo reduzir muito a proporção de água sem pôr em causa a trabalhabilidade. Têm, também, algumas limitações, pois trata-se de um material sintético de custo elevado e com uma duração de apenas trinta minutos como fluidificante, sendo necessário adicioná-lo novamente após esse tempo [Martins, 2008; Paiva, 2005].

2.3.4.3 Agentes retentores de água (agentes espessantes)

Designa-se por valor de retenção de água de uma argamassa o teor em água que permanece na argamassa após desidratação capilar pelo substrato absorvente onde é aplicada ou pelas condições atmosféricas.

Os agentes retentores de água são adjuvantes necessários para reter a água até à reacção de presa, sendo responsáveis pelos elevados valores de retenção de água das formulações de argamassas recentes [Paiva, 2005]. São também conhecidos como agentes espessantes, uma vez que aumentam a viscosidade e a coesão dos materiais. Esse aumento é fundamental em sistemas fluidos para reduzir a segregação de materiais constituintes e melhorar a homogeneidade, a resistência mecânica e outras propriedades do produto endurecido [Paiva, 2005; Seabra *et al*, 2007].

2.3.4.4 Agentes adesivos

Os agentes adesivos são substâncias poliméricas. O Acril33 é um agente adesivo cuja base é um copolímero ácido acrílico, com a fórmula química $C_5H_8O_2-C_5H_3O_2C_4H_6O_2-C_3H_2O_2$.

O uso de polímeros nos *grouts* confere boa adesão, elevada resistência à compressão e baixa viscosidade.

Apesar de serem usados em caldas de cal com fins estruturais, estes apresentam limitações, tais como baixa permeabilidade à água e uma baixa expansão térmica (Tavares, 2009).

2.3.5 Aditivos

As pozolanas são produtos naturais ou artificiais constituídos essencialmente por sílica e alumina que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que às temperaturas ordinárias se combinam, em presença da água, com hidróxido de cálcio da cal aérea, formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. São substâncias dotadas de grande reactividade com o hidróxido de cálcio mas insolúveis e inertes na água [Almeida *et al*, 2007; Coutinho, 1998].

As pozolanas podem ser naturais (materiais de origem vulcânica e rochas sedimentares com composição química apropriada), artificiais (caulinos ou outras argilas de qualquer tipo depois de sujeitas a temperaturas suficientes para a desidratação) ou ainda subprodutos industriais resultantes das centrais termoeléctricas que laboram a carvão mineral [Almeida *et al*, 2007; Coutinho, 1998].

No caso de rochas submetidas a tratamento térmico, a temperatura de cozedura é cerca de metade da necessária para o cozimento dos cimentos. As principais pozolanas artificiais resultantes do processamento térmico podem ser obtidas a partir de rochas siliciosas, como a diatomite – rocha resultante da fossilização, que é essencialmente constituída por sílica hidratada, muito reactiva com a cal depois de sujeita à acção da temperatura entre 500 e 900 °C - ou de rochas argilosas (silico-aluminosas), principalmente as do grupo da montmorilonite, da ilite e da caulite – como é o caso dos caulinos, que por cozedura se transformam em metacaulinos [Faria, 2004].

O metacaulino resulta então da cozedura do caulino a cerca de 750-800°C e a sua composição química é: 50-55% SiO₂, 40-45% Al₂O₃, 5% Fe₂O₃, <1% CaO e <1% MgO [Illiston *et al*, 2005; Martins, 2008].

As pozolanas são utilizadas desde a época dos romanos. *Vitrúvio* (Séc.I.a.C) já fazia referência a estes materiais, que alteravam as características das argamassas [Margalha, 2008]:

“ Apagada a cal, misturar-se-á à argamassa, de modo que se lancem nela três partes de areia, no caso de ser origem fóssil, para uma parte de cal; se de origem fluvial ou marinha, misturam-se duas partes de areia com uma de cal. Deste modo se conseguirá uma proporção ideal de caldeamento. Também se se acrescentar, como terça parte a esta areia fluvial ou marinha, cerâmica cozida em forno, moída e passada a crivo, conseguir-se-á uma mistura de argamassa de melhor aplicação ”.

Vitrúvio, Tratado de Architectura,

Livro II Capítulo V

“ Existe também uma espécie de pó que produz naturalmente soluções admiráveis. Surge na região de Baias e nos territórios dos municípios que estão em volta do monte Vesúvio. Quando misturado com cal e pedra miúda, não só garante consistência aos vários tipos de edificações, como também torna sólidos os molhes construídos no mar, sob a água ”.

Vitrúvio, Tratado de Architectura,

Livro II Capítulo VI

A utilização das argamassas pozolânicas perdeu-se com a desagregação do Império Romano, mas foi retomada a partir do Renascimento europeu e está na origem dos modernos cimentos. A redescoberta do uso das pozolanas deve-se ao labor dos humanistas italianos, tendo sido divulgado pelos grandes arquitectos e construtores renascentistas, entre os quais Fillipo Brunelleschi, redescobrimdo a utilização das argamassas pozolânicas de presa rápida na construção de cúpulas e pontes.

Em Portugal, encontram-se registos da utilização de argamassas com a adição de pozolanas no final do século XIX, principalmente em obras ribeirinhas, devido às suas características particulares de endurecimento debaixo de água [Velosa, 2002].

As pozolanas eram adicionadas para combater algumas debilidades apresentadas pelas argamassas de cal, tais como a falta de durabilidade e a dificuldade de endurecimento em ambientes húmidos. As argamassas cujo único ligante é a cal endurecem por reacção do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente na atmosfera, formando carbonato de cálcio e água enquanto os compostos siliciosos presentes nos materiais pozolânicos

reagem com o hidróxido de cálcio, na presença da água, formando silicatos e aluminatos. A existência destas reacções paralelas permite o endurecimento ao ar e em contacto com a água, fazendo face à necessidade de aplicação de argamassas em ambientes húmidos ou molhados e permitindo a execução de rebocos com uma espessura mais elevada do que a tradicional. Os silicatos e os aluminatos são responsáveis pelo aumento da durabilidade das argamassas [Velosa, 2002].

2.4 Comportamento reológico

A reologia (Rheos = fluir, logos = estudo) é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, avaliando as relações entre a tensão de corte aplicada e a deformação em determinado período de tempo. O comportamento reológico dos materiais representa-se assim pela relação entre o fluxo e as forças a que são submetidos [Cardoso, 2009].

O fluxo está relacionado com o movimento das camadas adjacentes dos elementos do fluido, ou seja, quando se aplica uma força de corte a um fluido, um gradiente de velocidade é induzido sobre ele. Ao factor de proporcionalidade entre a força e o gradiente de velocidade denomina-se por viscosidade e o gradiente de velocidade é igual à taxa de deformação [Paiva, 2005].

Um fluido que obedece a esta relação é denominado por newtoniano e comporta-se conforme se segue, $\tau = F/A = \eta \gamma$ onde τ é a tensão de corte, F é a força de corte e A a área do plano paralelo à força, η é a viscosidade, e γ é a taxa de deformação [Cardoso, 2009; Paiva, 2005].

No caso da reologia de suspensões, as partículas sólidas no meio de um fluido perturbam as linhas de fluxo aumentando a resistência do sistema ao escoamento, ou seja elevando a viscosidade. As características reológicas das suspensões são afectadas por diversos factores, entre eles: a concentração volumica de sólidos, as características do meio líquido, a temperatura, o tempo decorrido desde o início da mistura, as características físicas das partículas (distribuição granulométrica, densidade, morfologia, área superficial e rugosidade) e o tipo de interacção das partículas com o meio (estado de dispersão).

Como resultado, nas composições com elevadas concentrações de partículas, como no caso das argamassas, estas passam a interagir mais intensamente, fazendo com a reologia do sistema se desvie do modelo ideal de Newton para comportamentos não lineares como:

- pseudoplásticos: a viscosidade da suspensão diminui com o aumento da tensão de corte;
- dilatante: a viscosidade do sistema aumenta com a tensão de corte. É um comportamento típico de suspensões concentradas.

As suspensões podem apresentar uma tensão mínima necessária para que se inicie o fluxo, ou seja, uma tensão de escoamento. Quando solicitados por tensões abaixo da de escoamento, os materiais comportam-se como sólidos rígidos. Os materiais que apresentam pseudoplasticidade ou dilatância com a tensão de escoamento são denominados fluidos de Bingham.

O comportamento dos materiais pode depender da história ou tempo de corte, apresentando tixotropia, quando a viscosidade aumenta com tempo de aplicação da força e o corpo recupera o estado inicial após repouso suficientemente prolongado, ou reopexia, diminuição da viscosidade em função do tempo de corte.

2.4.1 Reologia de fluidos e suspensões

Admitindo que um fluido laminar de área A (suficientemente grande para se desprezar as condições de fronteira) está contido entre duas placas com área muito superior a A (colocadas de forma paralela a uma distância Y) e considerando que a superfície inferior se encontra imóvel e a superior se desloca a uma velocidade, V , devida à aplicação de uma força de corte F , se a distância entre as duas superfícies e a velocidade V não forem elevadas, pode-se considerar que a distribuição da velocidade, V , de cada plano paralelo de fluxo (definido relativamente à normal) é linear. Para uma vasta gama de fluidos, como os gases e os líquidos homogêneos, constata-se que a tensão de corte, τ , exercida entre dois planos paralelos do fluido é proporcional ao gradiente de velocidade, $\dot{\gamma}$, verificado numa direcção perpendicular ao escoamento:

$$\frac{F}{A} = \tau = \eta * \frac{dV}{dY} \text{ ou } \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (5)$$

em que F é a força de corte aplicada, A é a área do plano paralelo à força, τ é a tensão de corte ($\tau = F/A$), η é a viscosidade, e $\dot{\gamma}$ o gradiente de velocidade ($\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}$).

A equação (5) mostra que se a um líquido laminar for aplicada uma força de corte F , induz-se um gradiente de velocidade ao sistema. Ao factor de proporcionalidade entre a força e o gradiente de velocidade designa-se por viscosidade. O comportamento reológico de um fluido que satisfaça a equação (5) é designado por newtoniano é caracterizado apenas por um parâmetro: a viscosidade. Quando se trata de descrever o comportamento de suspensões concentradas, entendidas como uma suspensão de partículas sólidas num líquido viscoso, podemos ter dois tipos de expressões. Um relaciona a concentração da suspensão com a viscosidade, enquanto o outro expressa a tensão de corte em função do gradiente de velocidade, assumindo que a viscosidade do sistema é constante [Veiga, 2006].

Tabela 2.3 Relações entre a tensão de corte e o gradiente de velocidades (Ferraris (1999))

Autor	Expressão
Newton	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Herschel e Bulkley	$\tau = \tau_0 + k \eta \dot{\gamma}$
(Lei da potência)	$\tau = A \dot{\gamma}^n$
Von Berg e Oswald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + B \sin^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Eyring	$\tau = a \dot{\gamma} + B \sin^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni, Massida e Sanna	$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \sigma$

τ = tensão de corte;

τ_0 = tensão limite de escoamento;

$\dot{\gamma}$ = gradiente de velocidade;

$A, a, B, b, C, K, \alpha, \beta, \delta$ = constantes.

Na tabela 2.3 apresentam-se diferentes expressões, frequentemente usadas para caracterizar o comportamento reológico de fluidos e suspensões, que relacionam a tensão de corte com o gradiente de velocidade. A partir da análise das expressões apresentadas na tabela 2.4, pode-se verificar que em todas, exceptuando a aplicada a um fluido newtoniano,

apresentam pelo menos dois parâmetros são apresentados para descrever a reologia dos fluidos. Pode-se ainda verificar que as equações propostas por Bingham, Herschel e Bulkley e Von Berg e Oswald-de-Waele, nomeadamente, incorporam um segundo factor caracterizador da reologia: a tensão limite de escoamento, τ_0 [Veiga, 2006].

A tensão limite de escoamento pode ser interpretada fisicamente como a tensão que é necessária ultrapassar para que se inicie o escoamento. Para um fluido, o limite de escoamento corresponde ao ponto de intersecção do diagrama tensão de corte versus gradiente de velocidade com o eixo correspondente à tensão de corte. Em que o declive do referido diagrama, corresponderá ao valor da viscosidade. Se o fluido apresentar uma dependência linear entre as duas grandezas referidas, é designado por fluido de Bingham [Veiga, 2006].

2.4.2 Reologia de pastas, argamassas e betões

Os betões e as argamassas são materiais compostos, essencialmente constituídos por agregados, ligante e água e no que refere ao comportamento reológico podem ser entendidos como uma suspensão de partículas sólidas (os agregados) num líquido viscoso (a pasta ligante). A pasta ligante também pode ser vista como uma suspensão, sendo ela própria composta por grãos de cimento, por exemplo nos betões, num líquido (a água). Assumindo que o comportamento macroscópico de pastas, betões e argamassas se pode associar ao de um fluido, pode-se aplicar a estas suspensões os modelos clássicos de reologia [Veiga, 2006].

As expressões correntemente adoptadas para avaliar o comportamento reológico de pastas e argamassas são as que relacionam a tensão de corte com o gradiente de velocidade (Tabela 2.3) (Ferraris (1999)). A expressão mais utilizada para descrever o comportamento reológico das argamassas é a de Bingham devido à possibilidade de medir dois parâmetros independentes e porque o comportamento reológico é traduzido satisfatoriamente recorrendo a uma relação linear [Veiga, 2006].

Por outras palavras, são materiais que resistem sem fluir a tensões de corte inferiores à tensão de cedência, mas acima desta apresentam um comportamento linear entre a tensão de corte e a taxa de deformação, sendo caracterizados por uma viscosidade plástica (μ) [Paiva, 2006].

O tamanho e a forma dos flocos são os principais responsáveis pela reologia das suspensões. Através de agitação, destroem-se os flocos, sendo todo este processo acompanhado de uma redução da resistência ao fluxo. Quando se retira a agitação verifica-se uma refloculação. No caso das argamassas convém falar em destruição e reconstrução da estrutura, uma vez que após destruída a estrutura não é totalmente recuperada, isto é existe uma destruição irreversível [Veiga, 2006].

O método de espalhamento (EN 1015-3) é uma técnica muito usada para a caracterização das argamassas em termos de trabalhabilidade. Numa mesa de espalhamento coloca-se um cone, aberto em ambas as extremidades, preenchido com material. Sendo a tensão o peso do material por unidade de área, quando se retira o cone apenas se verifica espalhamento se a tensão de cedência for excedida. O que significa que o primeiro valor de espalhamento medido pode ser relacionado com a tensão de cedência. A segunda mesa de espalhamento é determinada após um número de batidas definido na mesa de espalhamento, estando este valor também relacionado com a viscosidade, uma vez que se houver escoamento, a tensão aplicada excedeu a tensão de cedência. Este método permite conhecer o estado de consistência da argamassa e se esta se encontra ou não dentro da zona de trabalhabilidade, sendo um precioso auxiliar de caracterização reométrica.

A utilização de reómetros permite determinar, separadamente, as duas características reológicas e são aparelhos muito sensíveis a pequenas variações das propriedades do fluxo [Paiva *et al*, 2007].

O reómetro usado, Viskomat, foi especificamente desenhado para medir o comportamento reológico das argamassas. E consiste num contentor cilíndrico onde se introduz a amostra de argamassa, sendo a seguir colocado num suporte com uma velocidade de rotação variável. Uma pá concêntrica de geometria adequada está montada numa cabeça que mede o torque, uma vez que à medida que o contentor cilíndrico roda, a resistência viscosa da argamassa ao fluxo através das lâminas da pá dá origem a um torque, que é continuamente registado ao longo do tempo de ensaio. A velocidade de rotação do contentor cilíndrico pode variar de acordo com o tipo de teste programado. A curva de fluxo pode ser construída sob a forma de torque (T) em função da velocidade de rotação (N) e, no caso de argamassas, o torque descreve o seu comportamento através da equação (9), sendo g e h constantes características do material [Martins, 2008; Moorhead, 1986].

$$T = g + hN \quad (6)$$

Banfill [Banfill, 1983; Banfill, 1990] confirmou experimentalmente que o parâmetro (h) é directamente proporcional à viscosidade plástica e o parâmetro (g) directamente proporcional à tensão de cedência, através do declive da recta e da ordenada na origem, respectivamente.

2.4.3 Efeito dos adjuvantes sobre o comportamento reológico

Os adjuvantes quando adicionados às argamassas, promovem alterações significativas no seu comportamento.

Banfill, [Banfill, 1983; Banfill, 1990] tem efectuado, nos últimos anos, um estudo sobre a reologia de materiais cimentícios. Nos trabalhos realizados, encontra-se o efeito de componentes como a água de amassadura, os agregados (areia) e alguns adjuvantes sobre o comportamento reológico da argamassa. O aumento da quantidade de água de amassadura provoca uma acentuada diminuição da viscosidade e da tensão de cedência. O aumento da fracção granulométrica mais fina traduz-se num aumento da tensão de cedência e da viscosidade. Em relação aos adjuvantes, os mais estudados em termos reológicos têm sido os agentes retentores de água, ou modificadores de viscosidade, e os agentes redutores de água, ou plastificantes. O uso do adjuvante agente redutor de ar, tem sido menos estudado, talvez pelo facto da sua principal função estar direccionada para a modificação das características do produto endurecido, tal como a resistência ao gelo/degelo [Paiva, 2005; Seabra *et al*, 2007].

O agente retentor de água, para além de reter a água da mistura, aumenta a sua coesão reduzindo a segregação dos constituintes. Estes agentes são usados para controlar o espessamento, a quantidade de água de amassadura e a trabalhabilidade das argamassas no estado fresco, entre outras propriedades no estado endurecido, como a resistência mecânica. De acordo com estudos efectuados para argamassas de cal hidráulica e de cimento, a introdução do agente retentor de água promove um efeito espessante ao qual corresponde um aumento dos valores da viscosidade e da tensão de cedência. Nalguns estudos foi observada a existência de um valor mínimo para a tensão de cedência, para um determinado conteúdo deste adjuvante. Quando se adiciona o agente retentor de água, no início do ensaio reológico, este induz um aumento dos valores de torque, isto é, promove

um aumento da resistência da argamassa ao fluxo. Este comportamento deve-se especialmente ao facto das cadeiras poliméricas do agente retentor de água fixarem, na sua periferia, moléculas de água, diminuindo assim a quantidade livre presente na argamassa. A partir de um certo tempo de agitação, o agente retentor de água passa a ter um efeito fluidificante que resulta provavelmente da introdução de ar e a sua acção lubrificante na mistura [Seabra *et al*, 2007].

Segundo estudos efectuados para argamassas de cal hidráulica e cimento, o uso de agentes redutores de água ou plastificantes reduz muito a sua resistência ao fluxo, devido à desfloculação e dispersão das partículas, além de promover a libertação de água que está retida entre os flocos das mesmas. A sua influência é bastante notória nos valores da tensão de cedência, os quais apresentam uma diminuição acentuada; enquanto os valores da viscosidade plástica não são muito afectados nem pela sua presença nem pela quantidade utilizada [Seabra *et al*, 2007].

2.5 *Grouts* – consolidação de revestimentos

Segundo Toumbakari, 2002, “uma calda de injeção, *grout*, é uma argamassa utilizada no preenchimento, homogeneização, consolidação e na melhoria das propriedades mecânicas de sistemas que apresenta cavidades, vazios, fendas ou falta de coesão ou de sistemas totalmente não coesos”.

De modo a restabelecer-se a perda de aderência, usa-se a técnica de consolidação com caldas de cal (*grouts*). Ao longo dos últimos anos os *grouts* têm sido os agentes mais comuns e usualmente utilizados para restabelecer a adesão entre camadas de revestimento ou entre o conjunto revestimento-suporte. A sua composição tem sido estudada e melhorada ao longo dos anos, apropriando aditivos e adjuvantes de acordo com as argamassas base. Esta técnica consiste na introdução de uma calda de cal (*grout*) na área vazia do destacamento que ocorreu entre o revestimento e o suporte (Tavares, 2009).

As caldas de cal têm que ser compatíveis, mecânica, física e quimicamente com os revestimentos originais. Constitui uma técnica de carácter irreversível uma vez que engloba trabalhos que não poderão ser removidos ou substituídos. O critério desta reversibilidade em intervenções de conservação e restauro deve-se à necessidade dos

edifícios e monumentos de transformações incorrectas, que sejam resultado, também, de intervenções de consolidação.

2.5.1 Técnicas de injeção

A injeção de uma calda de cal (fluida) em orifícios previamente efectuados nas paredes ou já existentes tem o objectivo de preencher cavidades, sejam elas fissuras ou vazios interiores. Esta técnica torna-se mais eficaz se nos elementos a intervir existir uma rede comunicante entre os vazios, porosidade aberta. No caso de estruturas mais vulneráveis do ponto de vista mecânico, a injeção das caldas deverá ser feita a uma altura inferior a um metro por dia, de modo a evitar pressões hidrostáticas excessivas das caldas, que poderão danificar a estrutura.

A injeção do *grout* em orifícios, executados previamente ou já existentes, é uma técnica manual através de seringas. Estas podem ser adaptadas com tubos de látex para um sistema de aplicação por gotejamento que ocorre com pouca pressão. A injeção deve ser efectuada por gravidade, se possível dos dois lados da parede, no sentido vertical ou com uma inclinação mínima (Tavares, 2009; Luso *et al*, 2007).

2.5.2 Propriedades das caldas de injeção

A aplicação de caldas de injeção em paredes de construções antigas deve sempre basear-se em estudos prévios do estado em que se encontra a estrutura, as dimensões das cavidades e fissuras existentes, bem como a identificação dos materiais, assim como o seu estado de degradação, as suas características físicas (granulometria) e a sua composição química. Uma boa compatibilização entre a calda de injeção e o suporte onde irá ser aplicada é um factor muito importante, pois assim poderá evitar-se nova deterioração relacionada com o comportamento mecânico ou químico com o material existente já deteriorado.

As propriedades mais importantes para a caracterização das caldas de injeção e que devem ser asseguradas em trabalhos de consolidação, são:

Fluidez

Capacidade de permanecer no estado fluido o tempo suficiente, enquanto ocorre a difusão homogénea nas cavidades. Esta depende da distribuição granulométrica dos grãos, da natureza, forma e superfície específica das partículas, da quantidade de água de amassadura e do método da mistura da calda.

Estabilidade

Capacidade de permanecer homogénea, antes de ocorrer a exsudação e a segregação. A estabilidade de uma calda de injeção depende da velocidade a que é feita a amassadura e varia com a adição de fluidificantes, redutores de água ou introdutores de ar. A estabilidade é melhorada pela introdução de partículas finas, como por exemplo cal.

Exsudação

É a migração da água para a superfície, com a formação de uma película superficial. Está relacionada com a relação água-ligante e com a distribuição granulométrica deste último. Este fenómeno prejudica em parte a qualidade da injeção, uma vez que a parte superior de um poro injectado pode não ficar consolidada devido à migração de água, em excesso, para essa zona.

Segregação

É a tendência para os materiais se posicionarem por estratos e depende da quantidade de água utilizada, da forma, da dimensão e da densidade das partículas.

Injectabilidade

É a capacidade de escoamento da mistura e desta se manter por um certo período de tempo, o qual permita uma injeção fácil dos *grouts*. O poder penetrante dos *grouts* depende de inúmeros factores, quer sejam intrínsecos (granulometria da parte sólida da mistura), quer morfológicos, do suporte (absorção/adsorção) e quer ainda dos materiais constituintes (forma e dimensão, superfície específica e finura).

Características mecânicas

As características mecânicas das caldas de injeção deverão ser o mais adequadas possível ao meio onde irão ser aplicadas. Deverão contribuir para uma substancial melhoria da

coesão e resistência mecânica do conjunto, mas também esta contribuição não deverá ser muito desproporcional à que já existe. Na tabela 2.4 resume-se os requisitos necessários para garantir as caldas de injeção.

Tabela 2.4- Resumo dos requisitos a garantir às caldas de injeção

Requisitos reológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Fluidez durante tempo suficiente e capacidade de penetração uniforme, de maneira a que os vazios se preencham de igual forma – injectabilidade. • Ausência de segregações (para evitar heterogeneidades). • A exsudação deve ser mínima, para diminuir a presença de vazios no estado endurecido.
Requisitos químicos	<ul style="list-style-type: none"> • Características químicas estáveis no tempo, capaz de formar reacções químicas fortes com o material existente (reacções irreversíveis). • Resistente aos sais de sulfato, de maneira a evitar eflorescências e produtos expansivos. • Teor de álcalis mínimo.
Requisitos físicos	<ul style="list-style-type: none"> • O tempo de início de presa deverá ser adequado ao tempo necessário à injeção. • Insolubilidade em água e estabilidade volumétrica em presença de humidade. • Calda com baixa retracção.
Requisitos mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> • Características semelhantes aos materiais originais ou ligeiramente superiores. • Caldas com boa e adequada aderência ao suporte para um bom funcionamento do conjunto.
Requisitos térmicos	<ul style="list-style-type: none"> • Calda com baixo calor de hidratação para evitar o desenvolvimento de gradientes térmicos que prejudiquem a aderência ao suporte.

Este trabalho pretende focar-se sobre o tema de conservação e durabilidade de revestimentos históricos, particularmente nas caldas de injeção para a consolidação de revestimentos. Entende-se por consolidação de um revestimento a penetração profunda de um material, que irá permitir uma melhoria das propriedades de coesão, reestruturando as

partículas do material desintegrado, melhoria das suas propriedades mecânicas e a aderência entre o conjunto revestimento/suporte ou entre várias camadas do revestimento.

O estudo reológico é de elevada importância, pois tem um grande impacto na eficiência da técnica de injeção, uma vez que o *grout* será injectado por seringas manualmente. No âmbito da reologia estudou-se algumas das características da calda da injeção, tais como a retenção de água, trabalhabilidade, viscosidade, fluidez e a sua influência.

3 Procedimento experimental

3.1 Descrição geral

Este capítulo pretende descrever a metodologia utilizada na realização deste trabalho. Irão ser apresentados os materiais utilizados e resume-se o processo de preparação das amostras analisadas pelas diferentes técnicas experimentais de caracterização. Descrevem-se também os métodos experimentais e seus procedimentos. Este trabalho visou o desenvolvimento de uma calda de cal (*grout*) que vise a consolidação, passível de ser injectada e compatível química, física e mecanicamente com os materiais pré-existentes. Daí ter sido fundamental o estudo do comportamento reológico do *grout* no estado fresco, de maneira a encontrar a fluidez necessária para se proceder a uma melhor injeção das caldas de cal (*grout*).

3.2 Formulações iniciais dos *grouts*

A tarefa fundamental é formular caldas de cal, usando a adição de vários materiais, tais como materiais pozolânicos e adjuvantes, de diferentes naturezas, de modo a conferir às argamassas trabalhabilidade e um bom desempenho no estado fresco.

A argamassa base para a consolidação é constituída por cal e farinha de sílica, no caso das usadas no estudo reológico e nos provetes prismáticos.

Nas tabelas 3.1 e 3.2, apresentam-se os materiais constituintes e a sua quantidade em massa de cada argamassa de *grout*. As argamassas têm na sua composição 60% de teor em água de amassadura relativamente ao peso global de sólidos. Começou-se por usar o traço 1:2 e fez-se um estudo acerca da evolução e do efeito da adição de diferentes teores de adjuvantes e aditivos. E posteriormente usou-se o traço 1:3 aproveitando o estudo feito com o traço anterior em relação aos teores a usar de adjuvante e aditivos e prossegue-se o estudo reológico agora das caldas a usar.

3. Procedimento Experimental

Tabela 3.1 – Formulações iniciais dos *grouts* no traço 1:2 (razão volúmica ligante: agregado)

Denominação	Teor em adjuvante (%)	Teor em aditivos (%)	Teor em água (%)*
Argamassa base (GCA_12_60W)	0	0	60
GCA_12_60W + Agente retentor de água (EC)	0,1; 0,15; 0,5; 0,6; 0,75; 1	0	60
GCA_12_60W+EC+ plastificante (GS)	0,6EC + (0,5;0,6;1;1,5) GS	0	60
GCA_12_60W + Metacaulino (argical 1200)	0	10, 20	60
GCA_12_60W + Diatomite	0	10, 20	60
GCA_12_60W + Diatomite + EC	(0,4; 0,6) EC 0,8EC	10 20	60

* % relativa à massa total de sólidos

Tabela 3.2 – Formulações iniciais dos *grouts* no traço 1:3 (razão volúmica ligante:agregado).

Denominação	Teor de adjuvante (%)	Teor de aditivos (%)	Teor de água utilizado(%)
Argamassa base (GCA_13_60W)	0	0	60
GCA_13_60W + metacaulino (argical 1200)	0	10, 20, 30	60
GCA_13_60W + metacaulino (argical 1200) +EC	(0,4;0,6)	10, 20, 30	60
GCA_13_60W + metacaulino (argical 1200) +EC + GS	(0,4;0,6;0,7)EC+1GS (0,4;0,5;0,6;0,7)EC+1GS (0,5;0,6;0,8)EC+1GS	10 20 30	60
GCA_13_60W + metacaulino (argical 1200) + EC + GS + Acril 33	0.4EC+1GS+0,5A33 (0,4,0,5)EC+1GS+0,5A33 (0,4,0,5)EC+1GS+0,5A33	10 20 30	60
GCA_13_60W + Diatomite + EC + GS + Acril33	(0,4;0,5;0,6) EC+1GS+0,5A33 (0,4;0,5;0,6) EC+1GS+0,5A33 (0,4;0,5;0,6) EC+1GS+0,5A33	10 20 30	60

3.3 Ensaios de caracterização

Foram efectuados vários ensaios de caracterização tanto às matérias-primas, como aos *grouts* no estado fresco e às argamassas no estado endurecido.

Na tabela 3.3 resume-se os materiais utilizados, assim como a sua denominação comercial e a sua função.

Tabela 3.3- Materiais utilizados na composição dos *grouts*

Materiais	Denominação comercial	Função
Cal aérea	Calcidrata	Ligante
Farinha de sílica	SS-160 Sifucel-silicas, SA	Agregado
Metacaulino	Argical 1200	Pozolana
Diatomite	—	Pozolana
Acril 33	—	Agente adesivo
Gluconato de sódio	PRS-CODEX (Marca Panreac)	Fluidificante/plastificante
Éter de celulose	Walocel MK100000PF30	Agente retentor de água

3.3.1 Caracterização das matérias-primas

3.3.1.1 Distribuição granulométrica das matérias-primas

A areia utilizada na formulação dos *grouts* foi a farinha de sílica, com denominação comercial SS-160 (Sifucel-silicas, SA), com a curva granulométrica apresentada na figura 3.1.

Os aditivos utilizados foram o metacaulino (argical 1200) e a diatomite, com as curvas de distribuição granulométricas representadas nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

3. Procedimento Experimental

A areia utilizada na formulação dos provetes de tijolo foi uma areia de rio, estando a sua distribuição granulométrica apresentada na figura 3.4.

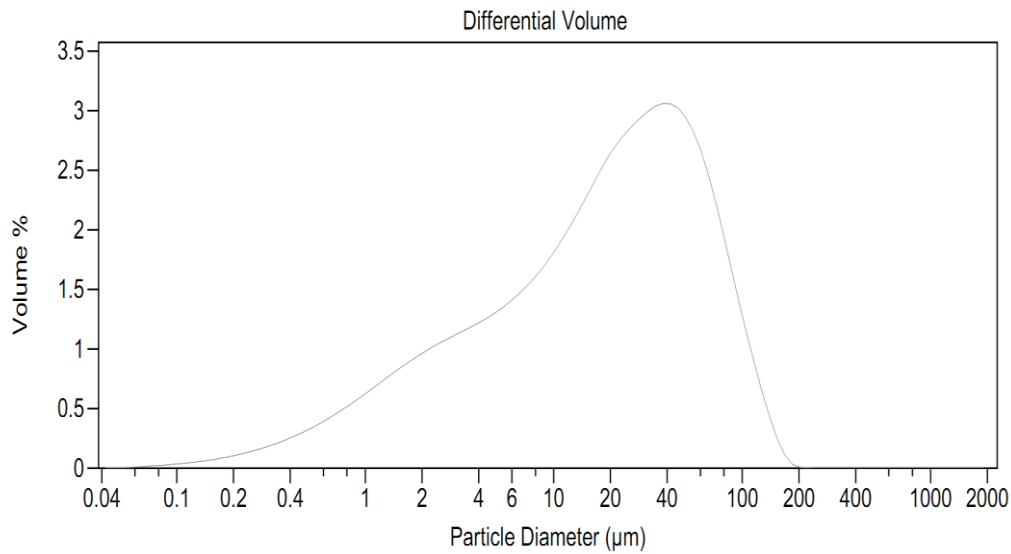


Figura 3.1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado (Farinha de sílica SS- 160) utilizado na composição das caldas de injeção.

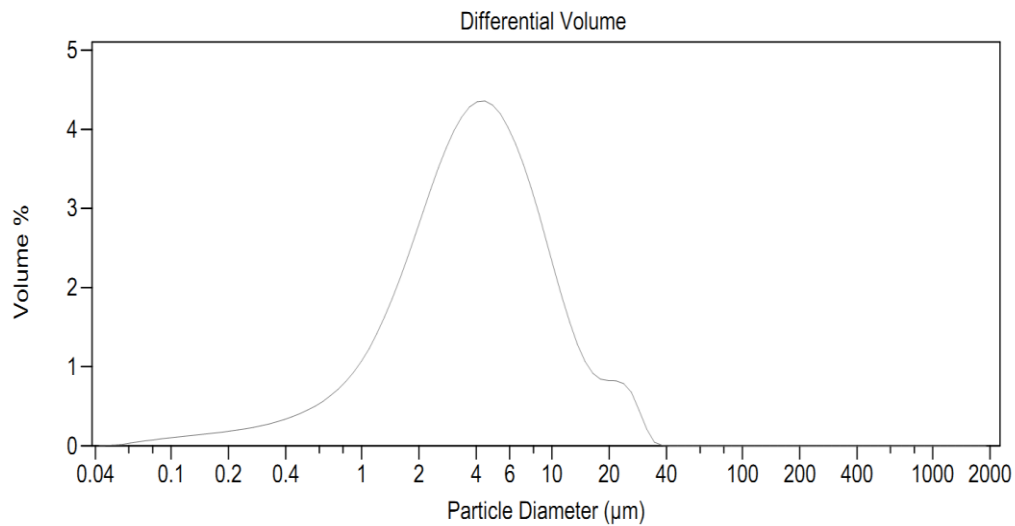


Figura 3.2 - Curva de distribuição granulométrica do metacaulino (argical 1200) utilizado nas caldas de injeção.

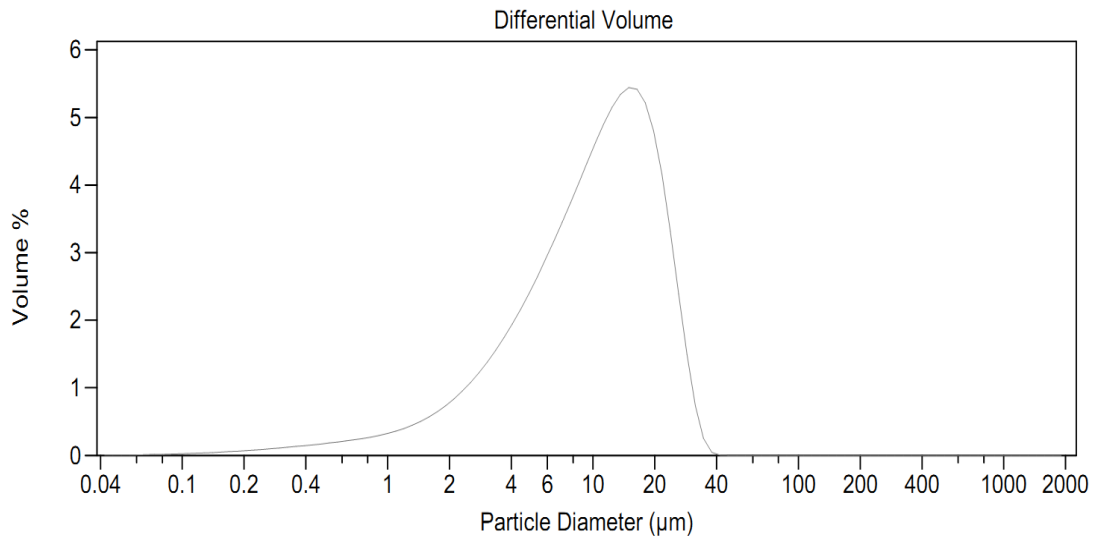


Figura 3.3 - Curva de distribuição granulométrica da diatomite utilizada nas caldas de injeção.

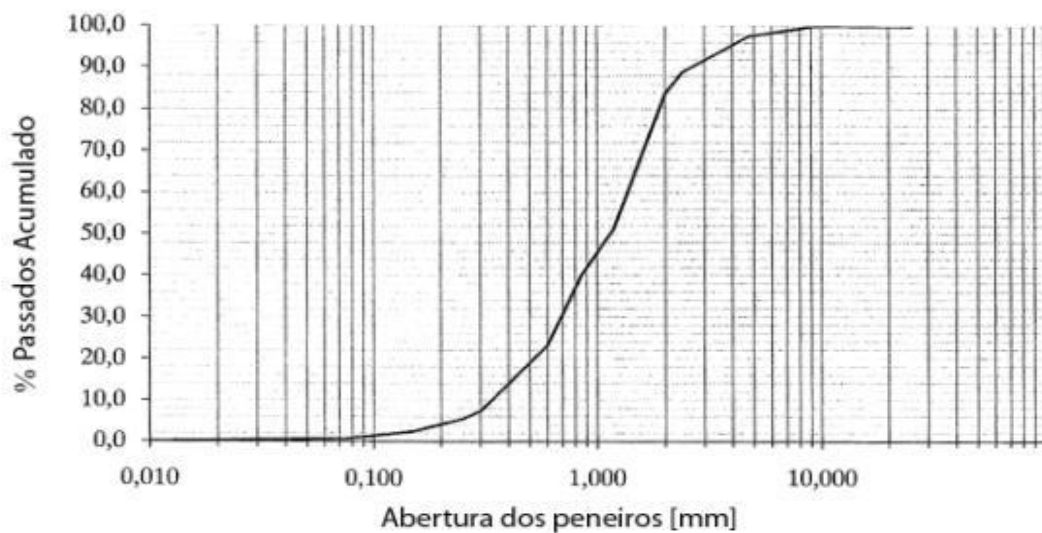


Figura 3.4 - Curva de distribuição granulométrica da areia do rio (Martins, 2008), usada na elaboração dos provetes de tijolo.

3.3.2 Ensaio de pozolanicidade (Chapelle modificado)

Este procedimento visa a determinação da quantidade de hidróxido de cálcio fixado, de modo a apreciar a actividade pozolânica de um material. Para se proceder à caracterização da pozolanicidade, foi necessário efectuar o seguinte procedimento para cada uma das pozolanas utilizadas:

- introduz-se num frasco de Erlenmeyer a pozolana finamente moída, juntando-se de seguida óxido de cálcio e água. Coloca-se um magnete no frasco e este numa placa de aquecimento ajustada a $90\pm 1^\circ\text{C}$, com agitação. Após atingir a temperatura pretendida, mantém-se a agitação e o aquecimento por 16h;
- arrefece-se a amostra, junta-se sacarose, agita-se durante 15 minutos e filtra-se de seguida;
- titular 25 ml de solução límpida com HCl 0,1N, em presença do indicador fenolftaleína, até à passagem de cor de rosa para incolor.

Os resultados são expressos em mg de Ca(OH)_2 fixados por grama de pozolana.

A reacção de dosagem é:



Ou

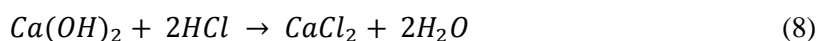


Tabela 3.4 - Resultados obtidos pelo ensaio modificado de Chapelle

Matéria-prima	Grau de pozolanicidade
	Mg Ca(OH)_2 /g pozolana
Cal (branco)	32,8
Argical 1200	1317
Diatomite	1442

3.4 Comportamento reológico

3.4.1 Preparação das caldas de injeção (*grout*)

O procedimento para a realização dos *grouts* envolve a mistura, num recipiente, primeiro dos constituintes líquidos e depois dos constituintes sólidos, nas quantidades previamente determinadas de acordo com o traço pretendido. De seguida, mexe-se manualmente com o

auxílio de uma colher de pedreiro ou uma espátula, de modo a juntar os constituintes acumulados no fundo do recipiente. Coloca-se a recipiente na misturadora, durante 90 segundos.

As quantidades de adjuvantes e de água de amassadura a adicionar são determinados relativamente à quantidade total de sólidos (isto é, ao peso seco da cal e dos agregados).

3.4.2 Avaliação da tensão de cedência e viscosidade por reometria

O ensaio reológico tem como objectivo estudar o desempenho das caldas de cal no estado fresco. O reómetro utilizado (Viskomat NT), especialmente desenhado para medir o comportamento reológico em argamassas, permite analisar a relação entre o fluxo e a deformação dos *grouts*. O Viskomat (Figura 3.5) consiste num contentor cilíndrico onde a amostra é colocada após devidamente preparada e misturada.

A amostra é colocada num copo de formato cilíndrico, de seguida esse copo é montado num suporte de rotação variável. Uma pá concêntrica de geometria adequada está montada numa cabeça que mede o torque. À medida que o copo roda, a resistência viscosa que o *grout* oferece ao fluxo através das lâminas da pá origina um torque que é medido e registado electronicamente ao longo de toda a duração do ensaio (Paiva, 2005).

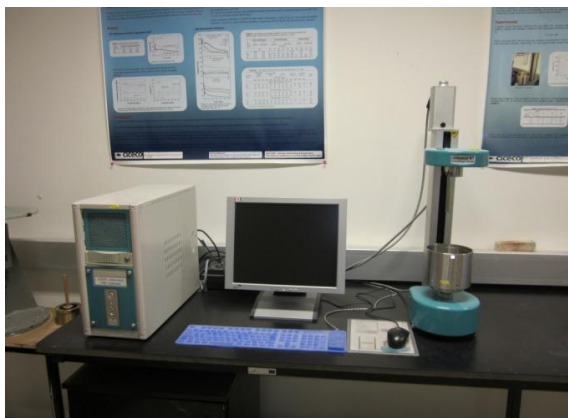


Figura 3.5 - Reómetro utilizado para argamassas (Viskomat)

Neste estudo, o perfil de velocidade de corte definido, denominado patamar, é um perfil em que a velocidade permanece constante, a 0 rpm, ao longo de cerca de 60 min, embora com subidas de velocidade periódicas, de 15 em 15 min, até às 160 rpm, diminuindo no mesmo período até às 0 rpm iniciais. Nas zonas de variação de velocidade, podem-se construir as curvas de fluxo.

As curvas de fluxo representam a variação do torque (T) em função da velocidade de rotação (N), a partir das quais se determinam as constantes proporcionais à viscosidade plástica (h) e à tensão de cedência (g), através do declive da recta e da ordenada na origem, respectivamente, considerando-se tratar-se de um *grout* com comportamento binghamiano típico ($T=g+hN$) [Paiva *et al.*, 2006].

A calda de cal deve ser injectada de forma lenta e constante de forma a não criar bolhas de ar, deverá também ser realizada numa altura inferior a 1 metro/dia para que as pressões hidrostáticas das caldas não danifiquem a estrutura (Tavares, 2009; Luso *et al.*, 2007).

3.5 Ensaio de simulação de consolidação de revestimentos

A simulação de consolidação de revestimentos foi efectuada em provetes de tijolo, provetes esses onde se simulou uma camada de reboco e um orifício a simular um vazio, onde se irá proceder à posterior injeção de caldas de cal.

A cura foi efectuada a 21°C e 65% Hr durante 28 dias, nesta primeira fase, e 60 ou 90 dias, numa fase posterior do trabalho.

A argamassa de reboco era constituída por cal aérea e areia do rio no traço 1:3. Foi efectuado o teste de espalhamento segundo a norma EN 1015-3 (espalhamento de 210 mm); de seguida realizou-se um chapisco de argamassa nos tijolos (Figura 3.6). Esta primeira camada de chapisco servirá para conferir rugosidade aos tijolos, para que haja uma maior aderência entre camadas.



Figura 3.6 - Fotografias da mesa de espalhamento, do espalhamento em si e da camada de chapisco.

Os tijolos devem ser humedecidos antes de se aplicar o emboco (com uma espessura de aproximadamente 1,5 cm), traço 1:3 e espalhamento de 210 mm aproximadamente. Deve-se também ter o cuidado de deixar rugosidades na superfície, para que a camada seguinte adira bem à já existente (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Camada de emboco

Após alguns dias, a camada de emboço foi limpa e humedecida e foram introduzidas três placas de acrílico com 60 mm de largura e aproximadamente 4 mm de espessura cada (comprimento variável) (Figura 3.8). As placas de acrílico foram oleadas, com óleo descorante, e entre elas colocou-se pó de pedra, para posteriormente facilitar a sua remoção.



Figura 3.8 - Introdução das placas de acrílico.

Colocou-se uma segunda camada de argamassa com traço 1:3 (espalhamento 210 mm), com uma espessura de aproximadamente 2 cm (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Segunda camada de argamassa

Após três dias de cura os provetes foram colocados numa sala condicionada a 21 °C e 65 % Hr. Posteriormente as placas foram retiradas (Figura 3.9). Quando se retiram as placas de acrílico convém raspar a zona interior da superfície oca para que haja uma melhor aderência entre a superfície e a pasta a injectar. Se tal não for feito, a aderência poderá ser mínima uma vez que a superfície em contacto com o acrílico ficará lisa.

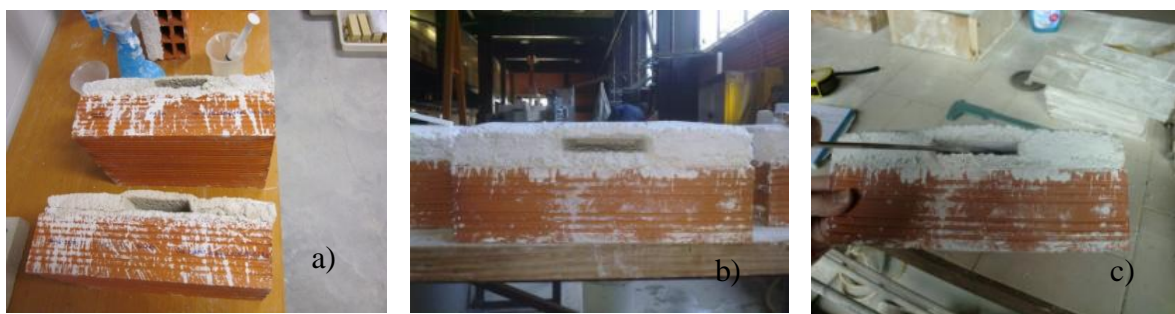


Figura 3.10 a, b) Provete pronto para injeção do *grout*, e c) Preparação do orifício entre camadas.

Com o recurso a uma seringa injectou-se em todo o vazio a calda de cal. Antes da injeção do grout deve-se humedecer a superfície com água ou com uma solução água:álcool 1:1



Figura 3.11- Injeção de caldas de cal.

Os provetes permaneceram durante 60 dias na sala condicionada 21 °C e 65 % Hr.

3.5.1 Ensaios de consistência do *grout* e do reboco (ultra-sons)

Os ultra-sons são uma técnica que tem como objectivo a avaliação do comportamento mecânico do material através da determinação da velocidade de propagação das ondas elásticas resultantes do impulso ultra-sónico percorrido entre dois pontos. As ondas atravessam o material e, através do tempo percorrido, é possível obter informações sobre as características do material a avaliar e o seu desempenho. De modo não destrutivo, esta técnica de análise permite a localização de possíveis zonas ocas, com fissuras, fendas, entre outras anomalias no material; assim como interferir quanto à sua homogeneidade interna (Mendonça, 2007).

Dado que as ondas se propagam por vibração das partículas sólidas que constituem o material, pode inferir-se que quanto mais denso ou compacto ele for, maior será a sua velocidade de propagação.

Esta técnica baseia-se na emissão de ondas elásticas, que ao atravessarem o material, permitem detectar alterações nas suas características, através da variação da sua velocidade de transmissão. Foi utilizado como equipamento uma PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester), que mede automaticamente o intervalo de tempo entre o emissor e o receptor e avalia a distância respectiva. Os provetes foram ensaiados aos 60 dias de idade.



Figura 3.12 - Ensaios de propagação de tempo usando uma Pundit.

Foram medidas duas zonas diferentes: i) em cima do *grout*, a uma distância de 13 cm entre o emissor e o receptor; e ii) em cima do reboco, a uma distância de 13 cm entre o emissor e o receptor. Foram registados os respectivos tempos de propagação.

3.5.2 Ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão (tubos de Karsten)

Esta técnica de ensaio baseada na metodologia adoptada pela RILEM (RILEM, 1980) consiste em medir a quantidade de água absorvida por uma determinada superfície do reboco ou acabamento, após um período de tempo, empregando um pequeno tubo graduado (de 0 a 4 cm³), em forma de cachimbo, que é fixado à zona que se quer estudar. As leituras da quantidade de água absorvida pelo revestimento são efectuadas com base na diminuição do nível de água observado no tubo graduado. A medida da permeabilidade à água por meio deste método pode ser usada para caracterizar qualitativamente o estado em que se encontra o reboco e a zona onde se injectou a calda de cal.

O objectivo deste ensaio foi avaliar a permeabilidade à água, nos *grouts* e das respectivas argamassas de reboco, em provetes com 60 dias de idade, (figura 3.13).



Figura 3.13- Ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão (tubos de Karsten).

3.5.3 Ensaios de aderência no *grout* e reboco envolvente

O objectivo do ensaio de aderência é avaliar a resistência de aderência das argamassas, realizado sobre provetes com simulação de descolamento entre camadas segundo a norma EN 1015 -12:2000. A preparação deste ensaio inicia-se com a marcação das áreas de teste, com aproximadamente 50 mm de diâmetro. Procedeu-se depois à colagem da pastilha de ensaio com uma cola epóxidica ao provete, exercendo-se durante alguns minutos uma pressão moderada na referida peça. Com a ajuda de um prego e uma lima realizou-se de seguida, manualmente, a incisão na profundidade da argamassa. O excesso do material escavado é retirado com a ajuda de um aspirador. Encaixou-se o dinamómetro e ajustou-se às pastilhas, colocando o indicador de escala na posição zero e iniciou-se o ensaio propriamente dito. Registam-se os valores da força máxima exercida e o tipo de rotura. Os provetes ensaiados foram ensaiados aos 60 dias de idade.

3.6 Características físicas

3.6.1 Execução de provetes de *grout*

O ensaio de retenção de água é usado para determinar a água que se mantém na argamassa para as reacções de hidratação, após a sucção inicial do suporte, no momento em que se aplica a argamassa.

Para se determinar a quantidade de água de amassadura a utilizar na elaboração dos provetes prismáticos, retiram-se pequenas amostras 30 min após a injeção dos *grouts* nos provetes de tijolo. Essa amostra é pesada e posteriormente colocada na estufa durante 48 h. Após esse tempo volta-se a pesar a amostra e vê-se a quantidade de água absorvida.

Os provetes prismáticos foram realizados segundo a norma NP EN 1015-11, para argamassas de cal aérea, mas sem o uso de gaze no fundo do molde.

Os moldes prismáticos utilizados têm dimensões de 40x40x160 mm³ e encontram-se em conjuntos de três moldes que são previamente limpos e lubrificados com óleo. Os moldes são preenchidos por duas camadas separadas de argamassa em que entre elas, são compactados com um pilão, com umas pancadas uniformemente distribuídas. Como os provetes devem ser bem compactados para não apresentarem vazios, para além da compactação referida, são ainda colocados numa mesa vibratória por mais uns segundos.

Usando uma régua metálica, alisa-se a superfície, retirando o excesso da argamassa presente. Na figura 3.14 mostram-se os moldes preenchidos com as argamassas de cal.



Figura 3.14 – Provetes prismáticos.

Ao fim de 3 dias os moldes foram desapertados, retirando-se as paredes internas e eliminando assim a pressão a que os provetes se encontravam sujeitos. Após possuírem

alguma rigidez os provetes foram desmoldados totalmente e colocados numa sala acondicionada a 21°C e 65% Hr, até à data dos ensaios, ou seja, aos 28 dias (figura 3.15). Após a desmoldagem os moldes devem ser limpos e oleados, para evitar corrosão dos mesmos.



Figura 3.15 – Provetes prismáticos na sala de acondicionamento.

3.6.2 Ensaio de retracção

São usados provetes circulares no ensaio de retracção (figura 3.16). Os moldes circulares apresentam um diâmetro de 70 mm. Os moldes são limpos e lubrificados e são preenchidos usando uma colher de pedreiro. Seguidamente a superfície é alisada pelo bordo com uma régua metálica. Os provetes ficam sujeitos à temperatura ambiente.



Figura 3.16 – Moldes circulares.



Figura 3.17– Provetes circulares

Após desmoldagem registam-se os valores da variação das medidas dos provetes (figura 3.17).

3.6.3 Resistência mecânica à flexão e à compressão

A avaliação da resistência mecânica à flexão e à compressão dos *grouts* sobre os provetes tipo prisma foi realizada segundo a Norma EN 1015:11.

No ensaio de resistência à flexão utilizou-se uma máquina universal de tracção que cumpria os requisitos da norma, equipada com uma célula de carga de 3 kN. Aplicaram-se a meio vão cargas uniformemente crescentes, até se dar a rotura do provete e registaram-se as respectivas forças de rotura. O equipamento deslocou-se a uma velocidade de 0,5 mm/min até à rotura do provete. Os provetes são colocados centrados e com o eixo longitudinal perpendicular ao dos apoios (Figura 3.18).



Figura 3.18 - Ensaio de flexão dos provetes prismáticos.

A força de ruptura à flexão corresponde à máxima força registada pela máquina. Registam-se as respectivas forças de ruptura e no final procede-se ao cálculo da resistência máxima à flexão:

$$R_f = \frac{3 * F_f * L}{2db^2} \quad (14)$$

Onde,

$$R_f = \text{Resistência à flexão} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

3. Procedimento Experimental

$b = \text{largura do provete(mm)}$

$d = \text{comprimento do provete(mm)}$

$L = \text{distância entre apoios inferiores (100mm)}$

$F_f = \text{carga aplicada ao centro do prisma na rotura (N)}$

No ensaio de resistência à compressão (figura 3.19) utilizou-se uma máquina universal de compressão que cumpria os requisitos da norma, equipada com uma célula de carga de 3 kN.

Colocaram-se os meios prismas resultantes do ensaio de flexão num dispositivo de compressão, que assegura uma área de contacto de 40x40 mm com as superfícies que transmitem carga perpendicular ao eixo de base de apoio e registaram-se as respectivas forças de rotura.



Figura 3.19 - Ensaio de compressão dos provetes prismáticos.

Procede-se de seguida ao cálculo da resistência máxima à compressão (R_c):

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad (15)$$

Onde,

$$R_c = \text{Resistência à compressão} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

$F_c = \text{Carga máxima de roptura (N)}$

$S = \text{área de contacto (mm}^2\text{)}$

3.6.4 Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado segundo a norma EN 1015 – 18:2002, e tem como objectivo apurar a capacidade do *grout* em absorver água por capilaridade.

De acordo com a norma, colocaram-se 3 provetes de cada composição, resultantes do ensaio à flexão, em contacto com a água. Registou-se o peso dos provetes secos, de minuto em minuto até aos primeiros 10 min de imersão e depois de 5 em 5 minutos de imersão, até cumpridos 45 minutos (não foi necessário chegar a 90 min, como indica a norma, pois os provetes encharcam rapidamente). Na figura 3.20 está representado o ensaio de capilaridade.

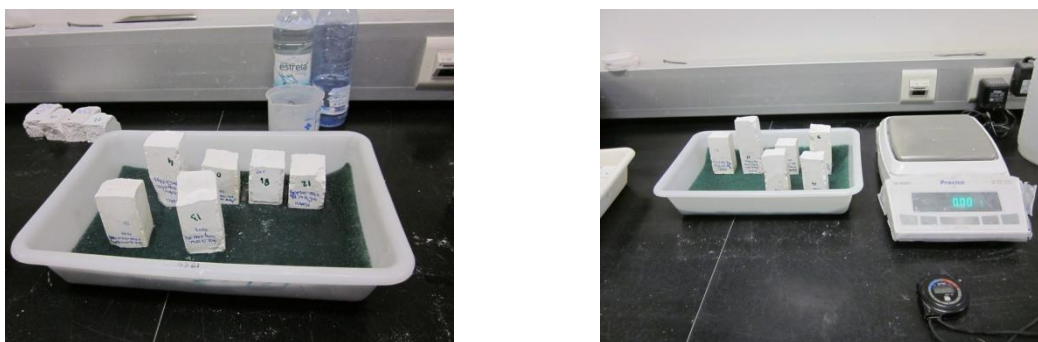


Figura 3.20 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.

A absorção de água por capilaridade pode ser traduzida pela curva de absorção capilar que corresponde ao gráfico que exprime a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do provete (em ordenadas [kg/m^2]), em função da raiz quadrada do tempo decorrido (em abcissas [$\text{min}^{1/2}$]).

O coeficiente de absorção de água por capilaridade C [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$] é a massa de água absorvida por unidade de tempo, através de uma superfície unitária de uma amostra seca, quando esta é colocada em contacto com uma camada de água. É retirado da relação $(m/A) = C \cdot t^{0.5}$, onde m é a massa de água absorvida (kg), A é a área de contacto entre a amostra e a camada de água (m^2) e t o tempo de duração do ensaio (minutos).

4 Resultados e discussão

4.1 Comportamento reológico de argamassas

O estudo do comportamento reológico foi iniciado com medidas no reómetro Viskomat efectuadas na argamassa base, traço 1:2, apenas com cal e farinha de sílica, sem a adição de adjuvantes ou aditivos.

Na preparação da argamassa base usou-se um em de água de 60%, relativamente ao peso total de material seco.

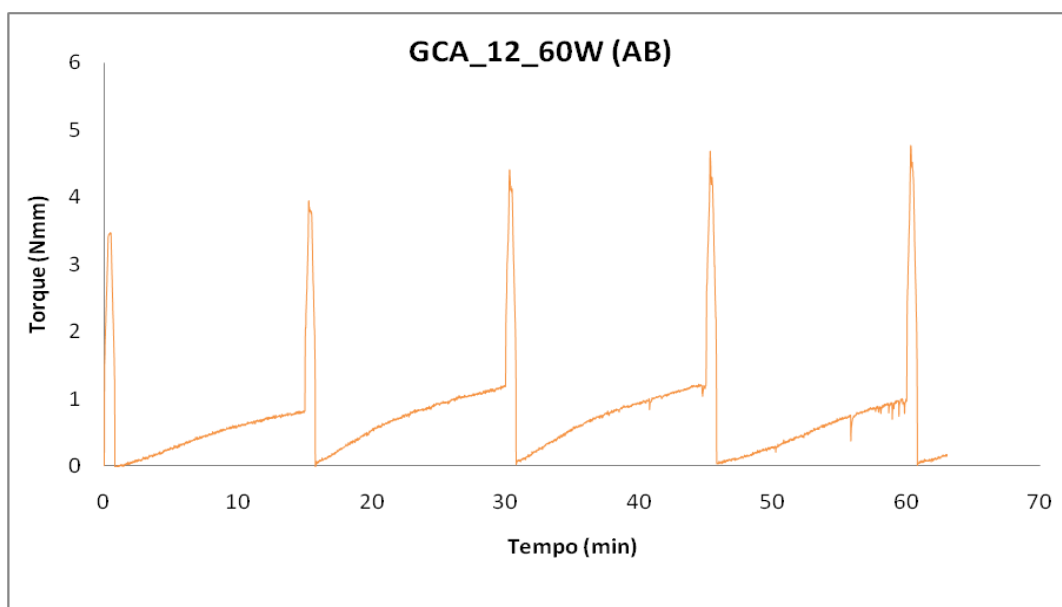


Figura 4.1 - Variação do torque em função do tempo de ensaio para a argamassa base com 60% de água de amassadura (perfil patamar a 160 rpm).

A figura 4.1 apresenta a curva típica de variação de torque em função do tempo de ensaio usando um perfil em patamar à velocidade de 160rpm. O torque começa por aumentar significativamente como consequência do aumento da velocidade de corte até 160 rpm. De seguida observa-se uma diminuição do torque devido à destruição da estrutura. Definiu-se no Viskomat o perfil em que existe um acréscimo do torque após o início e aos 15, 30, 45 e 60 min, que se deve ao aumento da velocidade até às 160 rpm e respectiva retoma de velocidade do ensaio, 0 rpm. É através desta variação de velocidade que se torna possível obter as curvas de fluxo e, desta forma, determinar os parâmetros reológicos dos *grouts* em análise.

No decorrer do tempo de ensaio, verifica-se um aumento do torque que poderá ser atribuído à aproximação do início da presa e a um efeito de reestruturação quando em repouso.

Utilizou-se como referência o comportamento reológico de duas pastas de cal (*grout*) comerciais seleccionadas por Tavares [Tavares *et al*, 2007], por serem as que apresentam melhores resultados a nível dos ensaios realizados. As argamassas comerciais designam-se por PMLA e PMLI, são argamassas pré-doseadas, cujos ligantes são a cal hidratada e a cal hidráulica, respectivamente. Estas argamassas foram preparadas utilizando um teor em água de amassadura de 60%. A Figura 4.2 apresenta as curvas típicas da variação de torque em função do tempo de ensaio, para um patamar de velocidade a 160 rpm, das pastas de cal comerciais (PMLA e PMLI).

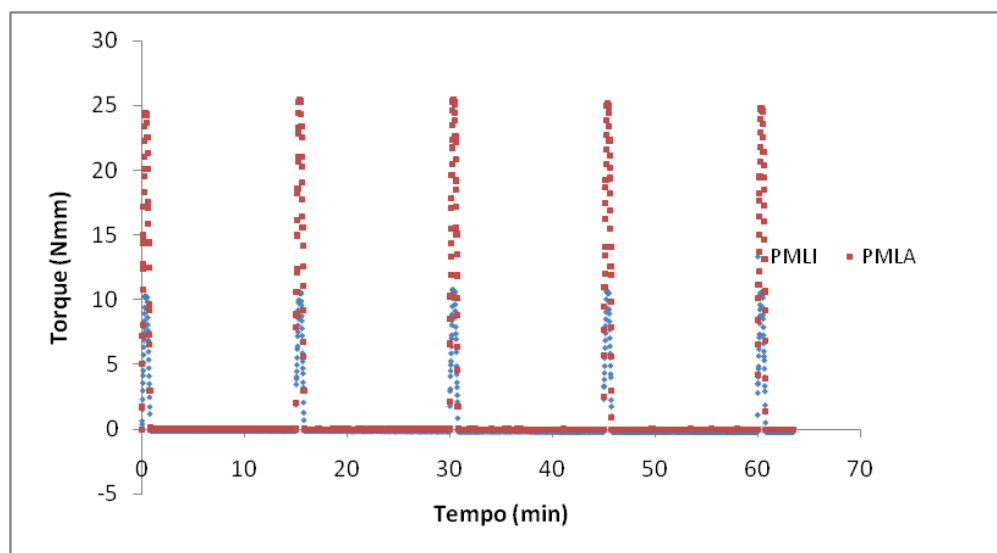


Figura 4.2 - Variação do torque com o tempo de ensaio das pastas de cal de referência (PMLA e PMLI).

Na figura 4.3 compara-se a argamassa base, GCA_12_60W, com as pastas de cal de referência (PMA e PMLI).

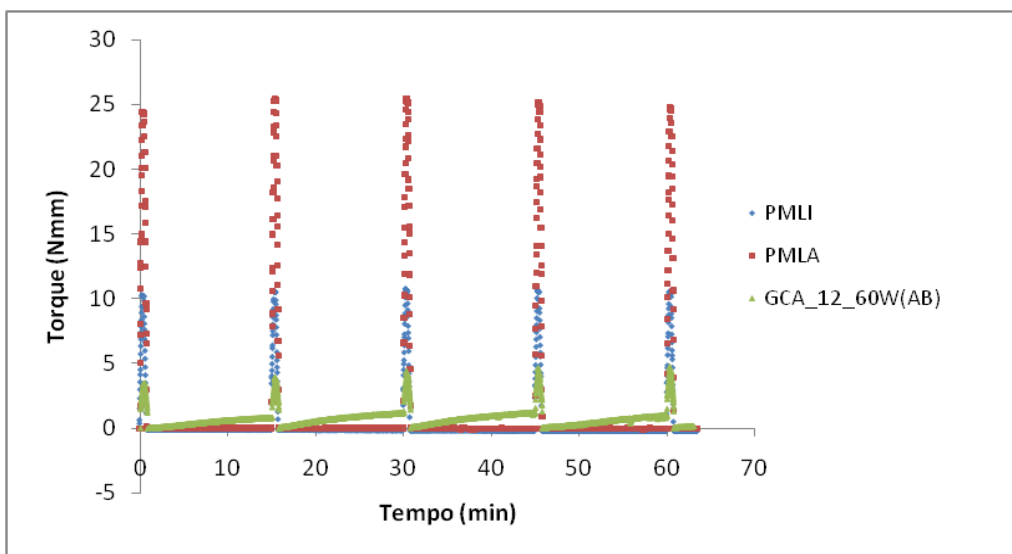


Figura 4.3 - Variação do torque com o tempo de ensaio das pastas de cal de referência (PMLA e PMLI) e a pasta de cal hidratada base, GCA_12_60W.

A equação de Bingham é a mais ajustada para o modelo de comportamento de argamassas e betões [Ferraris, 1999] por ser a que melhor traduz a evolução reológica e é a que possui maior fiabilidade para a determinação dos parâmetros reológicos (g e h). Na figura 4.4 observa-se que o comportamento do fluxo da pasta de cal base segue o modelo de Bingham.

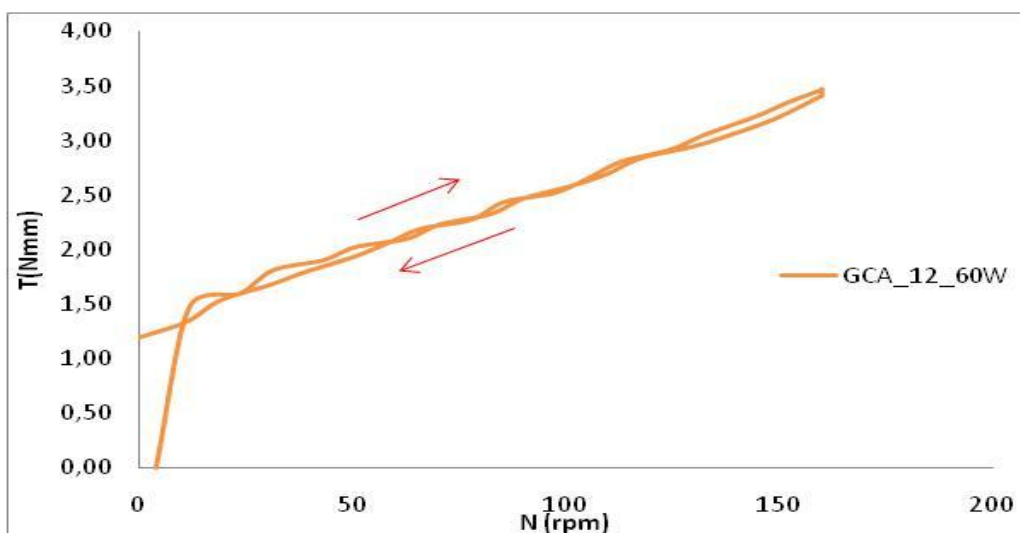


Figura 4.4 - Curva de fluxo obtida com a argamassa base a 160 rpm para o tempo de ensaio de 0 min. As setas indicam a velocidade ascendente e descendente.

O comportamento de fluxo da argamassa é consistente com o modelo de Bingham, sobretudo quando se considera a curva obtida com a velocidade ascendente.

Na figura 4.5 encontra-se a recta que se ajusta ao modelo para a obtenção dos parâmetros reológicos g e h , de acordo com a equação $T = g + hN$.

Na figura 4.5 indica-se também a equação de fluxo juntamente com o factor de correlação resultante. Este valor é bom o que indica que o modelo de Bingham se ajusta a estas caldas de cal (grout) para injeção.

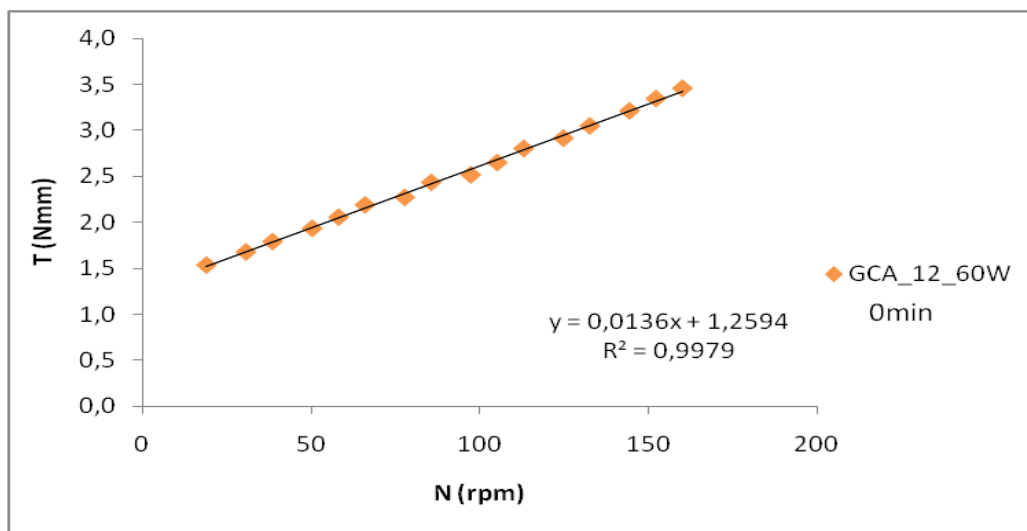


Figura 4.5- Curva de fluxo do *grout* obtida no minuto zero do ensaio num ensaio com perfil em patamar a 160 rpm. Determinação dos parâmetros reológicos de acordo com o modelo de Bingham.

A equação inserida na figura 4.5 apresenta os valores relativos a h (0,0136 N.mm.min) e g (1,2594 N.mm) para este *grout*.

Nas figuras 4.6 e 4.7 verifica-se a evolução da argamassa base em relação aos parâmetros reológicos h e g . Em relação à viscosidade os valores encontram-se abaixo das argamassas comerciais de referência, mas em relação à tensão de cedência encontram-se dentro dos limites.

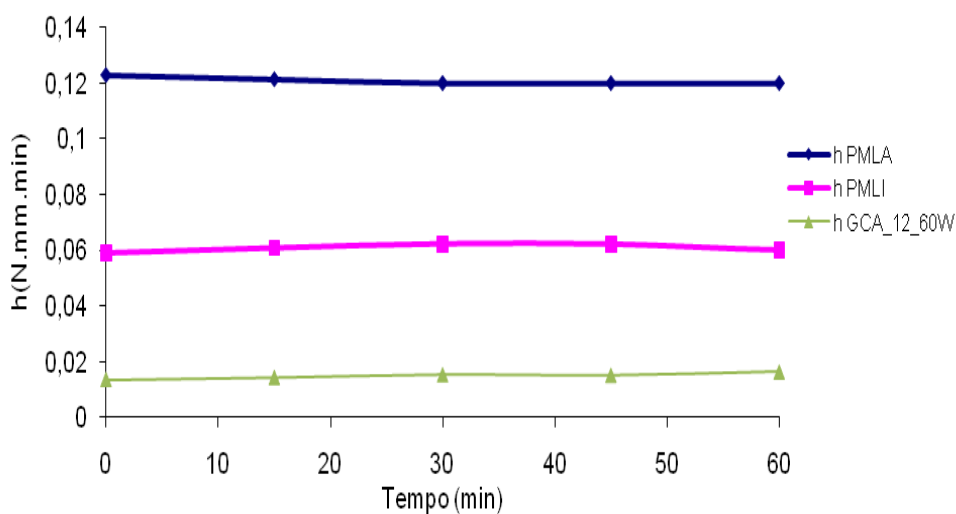


Figura 4.6 - Parâmetro reológico h das caldas de cal comerciais e do grout base, GCA_12_60W.

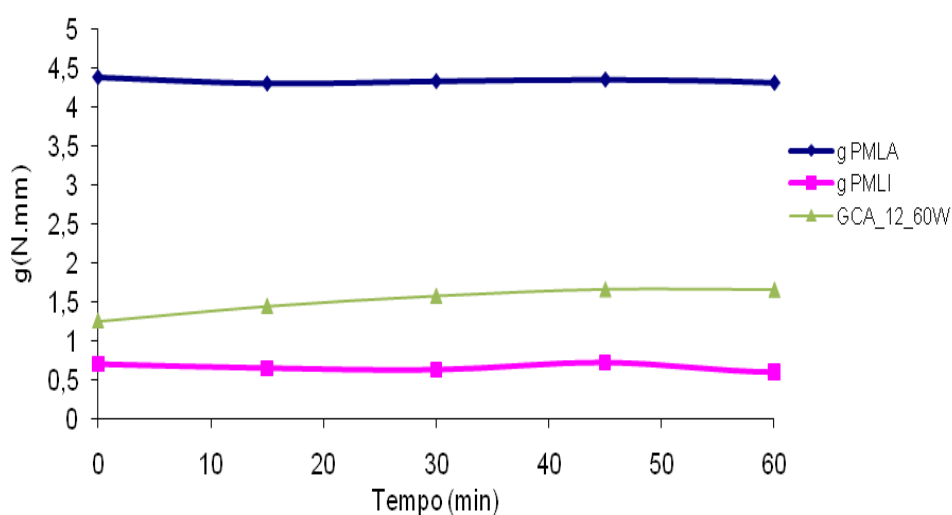


Figura 4.7 - Parâmetro reológico g das caldas de cal comerciais e do grout base, GCA_12_60W.

4.2 Efeito dos adjuvantes no comportamento reológico

Nesta secção pretendeu-se avaliar o papel de alguns adjuvantes no comportamento reológico da argamassa em estudo.

4.2.1 Efeito do agente retentor de água

O agente retentor de água utilizado foi o Walocel MK 100000PF30, que é um derivado do éter de celulose, metilohidroxipropil de celulose (MHPC), aqui abreviadamente designado

por éter de celulose. Estes agentes retentores de água permitem reter a água da amassadura, a água permanece na argamassa um período mais longo, o que facilita a reacção de presa.

São também bons agentes espessantes uma vez que aumentam a viscosidade e a coesão dos materiais, melhoram também a trabalhabilidade e a adesão nas argamassas onde são usados. Os agentes espessantes são basicamente constituídos por polímeros solúveis em água.

Os teores em éter de celulose utilizados foram estabelecidos de forma a avaliar a variação dos parâmetros reológicos h e g . Decidiu-se então começar por 0,1% relativo ao peso global de sólidos, seguindo-se 0,15%, 0,5%, 0,6%, 0,75% e 1%.

Nas figuras 4.8 e 4.9 pode observar-se para diferentes teores dos agentes retentores de água a evolução dos parâmetros reológicos h e g ao longo do tempo de ensaio (60 min).

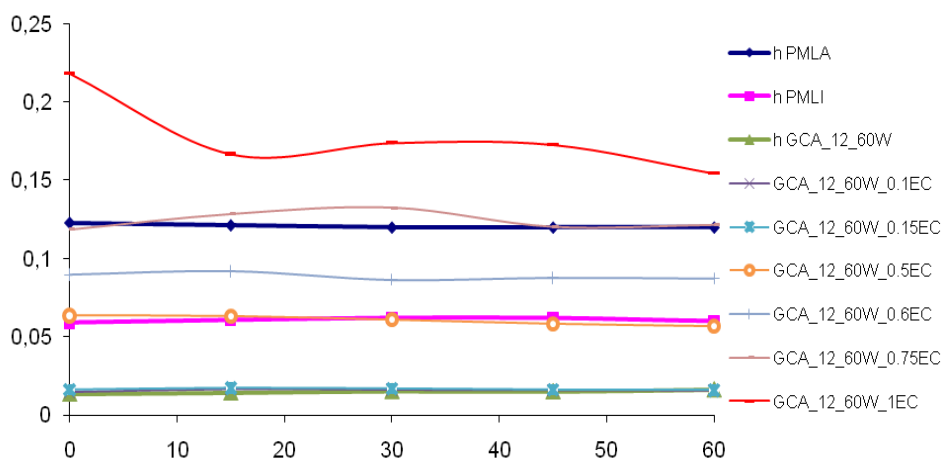


Figura 4.8- Efeito do teor do agente retentor de água, EC, sobre o parâmetro reológico g , determinado a partir de ensaios efectuados com um perfil em patamar (60% água de amassadura).

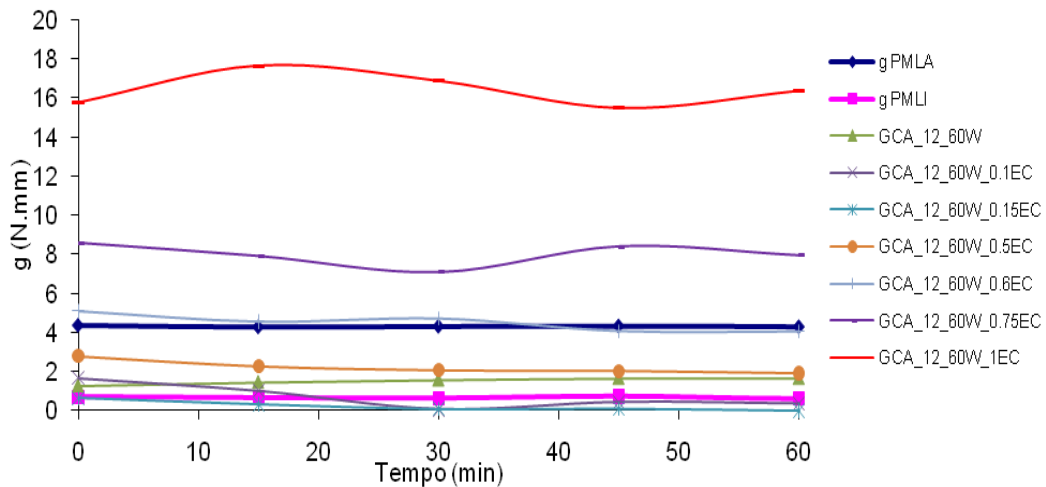


Figura 4.9- Efeito do teor do agente retentor de água, EC, sobre o parâmetro reológico g, determinado a partir de ensaios efectuados com um perfil em patamar (60% água de amassadura).

A introdução de agente retentor de água, EC, provocou um efeito espessante, ao qual corresponde um aumento dos valores da viscosidade plástica e da tensão de cedência.

Ao longo do tempo o EC não provoca uma variação significativa na viscosidade (h) e na tensão de cedência (g).

A composição que parece mais favorável e que se encontra dentro dos limites aceitáveis é: GCA_12_60W_0.6EC.

4.2.2 Efeito do agente plastificante

O agente plastificante usado foi o PRS_Codex – marca Panreac ($C_6H_{11}NaO_7$), cuja substância base é o gluconato de sódio com um grau de pureza de 98%.

Os plastificantes ou agentes redutores de água promovem o decréscimo da quantidade de água a utilizar na amassadura e fluidificam o material. Permitem, portanto, manter a trabalhabilidade pretendida, mesmo quando se diminui a quantidade de água de amassadura.

Pretende-se então avaliar o efeito do GS (gluconato de sódio) nos parâmetros h e g ao longo do tempo, usando também o adjuvante éter de celulose, com um valor fixo de 0,6%

O gluconato de sódio, GS, variou, em relação ao peso total de sólidos, 0,5%, 0,6%, 1% e 1,5%.

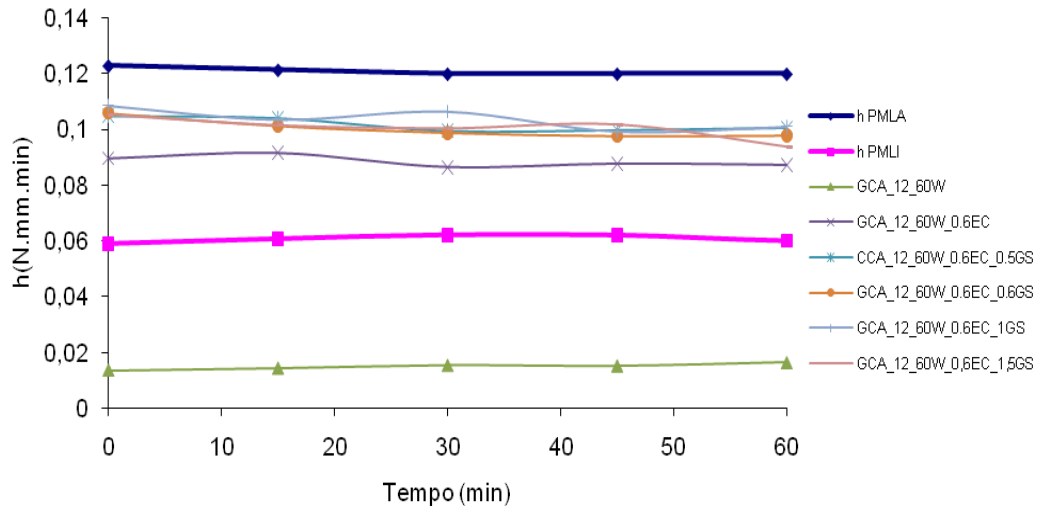


Figura 4.10 - Efeito do agente plastificante sobre o parâmetro reológico h, determinado a partir de ensaios efectuados com um perfil em patamar (argamassa com 60% de água de amassadura).

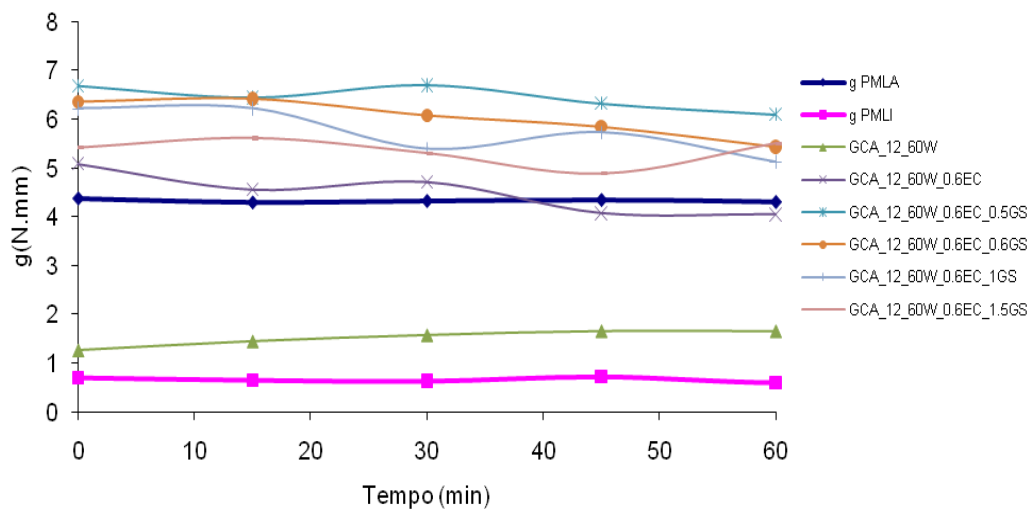


Figura 4.11- Efeito do agente plastificante sobre o parâmetro reológico g, determinados a partir de ensaios efectuados com um perfil em patamar (argamassa com 60% de água de amassadura).

Pelas figuras 4.10 e 4.11 conclui-se também que todas as composições estudadas de GCA_12_60W_0.6EC + x GS encontram-se dentro dos limites de referência em relação à viscosidade (h) e acima do limite máximo de referência (PMLA) em relação aos valores de tensões de cedência (g).

O gluconato de sódio (GS), como agente fluidificante, provoca uma redução na viscosidade, embora pouco notória, e nos valores da tensão de cedência da calda de cal com 60% de água de amassadura.

4.3 Efeito dos aditivos no comportamento reológico

Os aditivos pozolânicos usados neste trabalho foram o metacaulino (Argical 1200) e a diatomite. Estudou-se o efeito da substituição parcial (10 e 20%) na quantidade de ligante.

4.3.1 Efeito do metacaulino (argical 1200)

Na Figura 4.12 verifica-se que a adição de metacaulino, por si só, não trouxe alterações significativas aos valores da viscosidade (h).

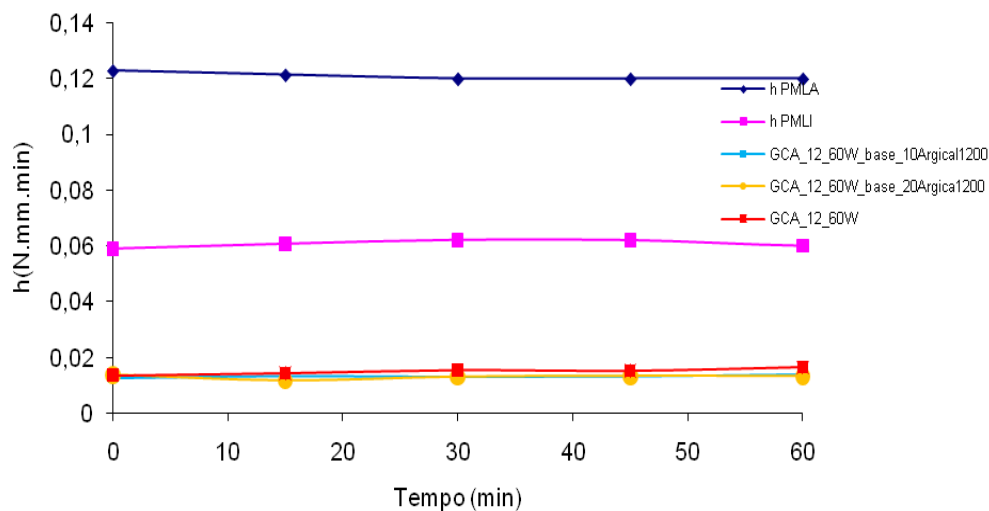


Figura 4.12-Efeito do metacaulino (10, 20% sobre o teor de ligante) no parâmetro reológico h , tendo como base de comparação a argamassa base, GCA_12_60W.

Na Figura 4.13 denota-se a influência do metacaulino nos valores da tensão de cedência: à medida que se aumenta a quantidade de metacaulino, aumentam também os valores da tensão de cedência.

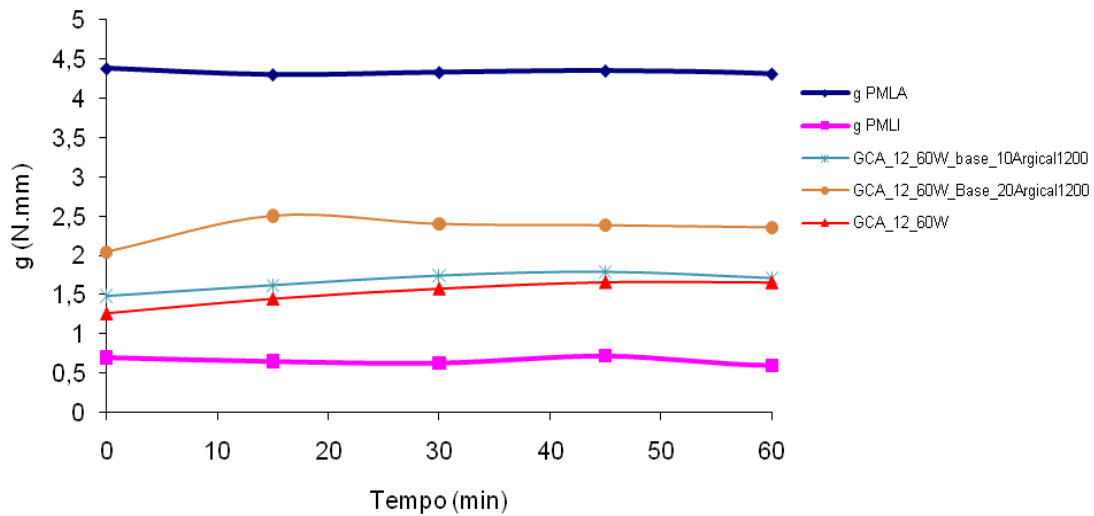


Figura 4.13- Efeito do metacaulino (10, 20% sobre o teor em ligante) no parâmetro reológico h , tendo como base de comparação a argamassa base, GCA_12_60W.

4.3.2 Efeito da diatomite

Na figura 4.14 e 4.15 verifica-se o efeito de diferentes teores de diatomite (em substituição no ligante), sobre os parâmetros reológicos h e g , respectivamente.

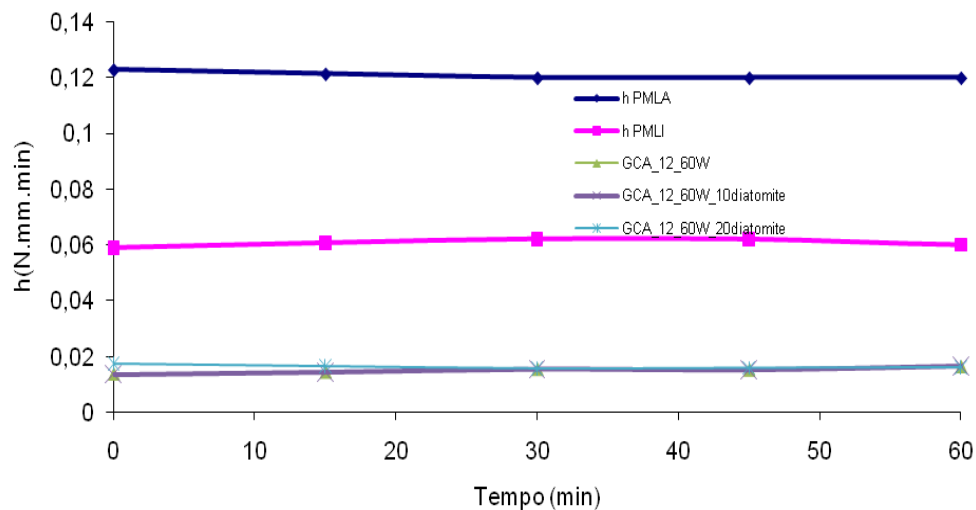


Figura 4.14 - Efeito da diatomite (10, 20% sobre o teor de ligante) no parâmetro reológico h , tendo como base de comparação a argamassa base, GCA_12_60W.

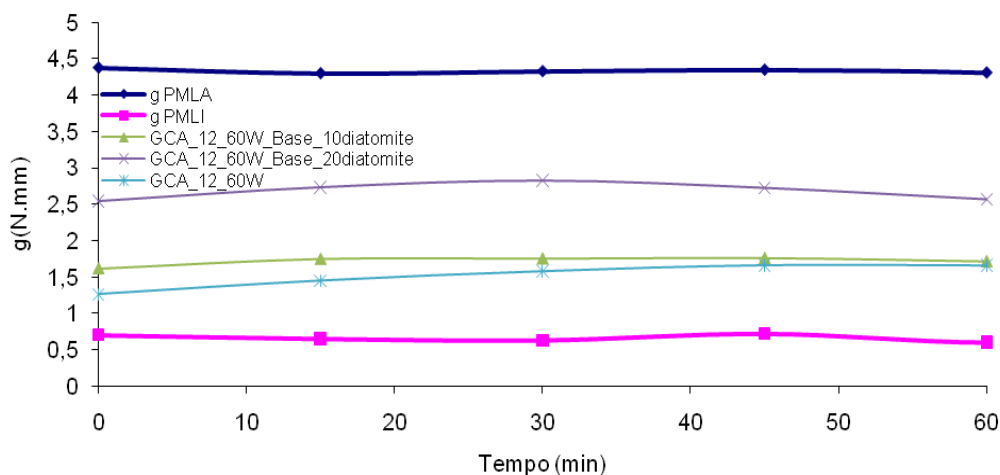


Figura 4.15 - Efeito da diatomite (10, 20% sobre o teor em ligante) no parâmetro reológico g , tendo como base de comparação a argamassa base, GCA_12_60W.

O aumento do teor em diatomite aumenta os valores da tensão de cedência (g) sem grande influência na viscosidade (Figuras 4.14 e 4.15).

Verifica-se que em termos de viscosidade é um pouco indiferente substituir parte do ligante por metacaulino ou por diatomite, pois os valores de h são muito semelhantes entre si.

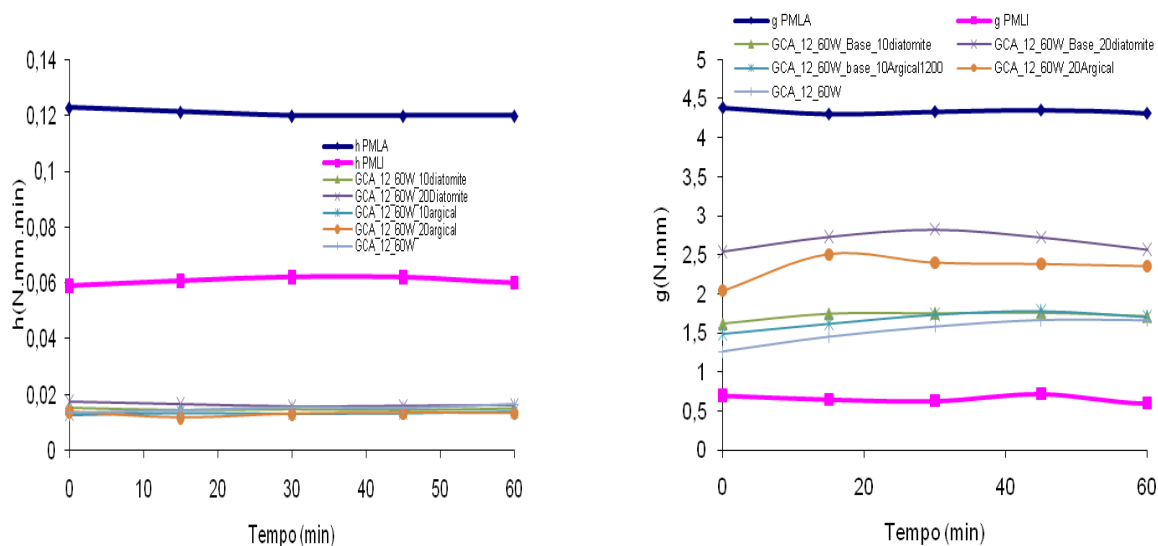


Figura 4.16 - Gráficos comparativos dos valores de h e g para o metacaulino e para a diatomite.

Em termos de valores de tensão de cedência (g) são notórias as diferenças. O uso de diatomite origina valores mais elevados de tensão de cedência (g), possivelmente devido ao seu grau de finura.

Após o estudo do efeito reológico de alguns adjuvantes e alguns aditivos sobre a viscosidade e a tensão de corte, chegou-se à conclusão que se devia testar outro traço 1:3, tendo como base toda a informação fornecida pelos ensaios reológicos nas caldas de cal com o traço 1:2.

Para melhor compreensão da decisão tomada as figuras seguintes exemplificam bem a diferença do uso do traço 1:2 ou 1:3 (figura 4.17 e 4.18). Essa influência é bem visível, principalmente nos valores da tensão de cedência (figura 4.18).

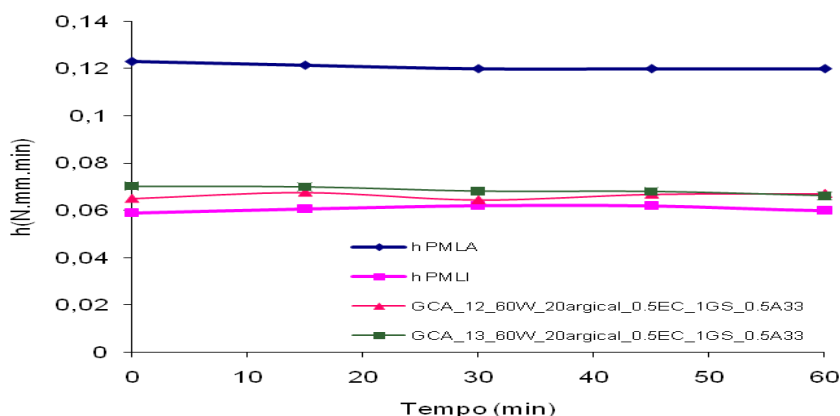


Figura 4.17- Comparação dos valores de h para duas argamassas diferentes, com a mesma composição mas para diferentes traços.

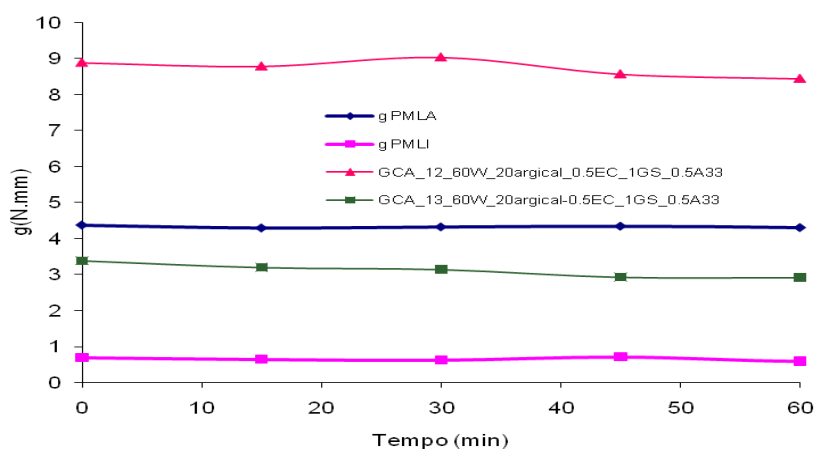


Figura 4.18- Comparação dos valores de g para duas argamassas diferentes, com a mesma composição mas para diferentes traços.

A nível de valores de viscosidade estes são muito semelhantes, sendo a variação mínima, mas já em termos de valores de tensão de cedência o uso do traço 1:2 aumenta drasticamente os valores da tensão de cedência, tornando-se mais difícil afinar formulações dentro do traço 1:2, comparativamente ao traço 1:3. Decidiu-se assim avançar para o estudo reológico com composições baseadas neste último traço.

4.4 Estudo reológico de *grout* com traço 1:3

4.4.1 Caldas de cal com metacaulino

Começou-se o novo estudo, com o traço 1:3, por se avaliar o efeito do éter de celulose nos valores de h e g . Agora também se pretende avaliar a introdução de diferentes valores de metacaulino. Nas Figuras 4.19 e 4.20 avalia-se o efeito da substituição de parte da cal por 10% de metacaulino sobre os parâmetros reológicos h e g , respectivamente.

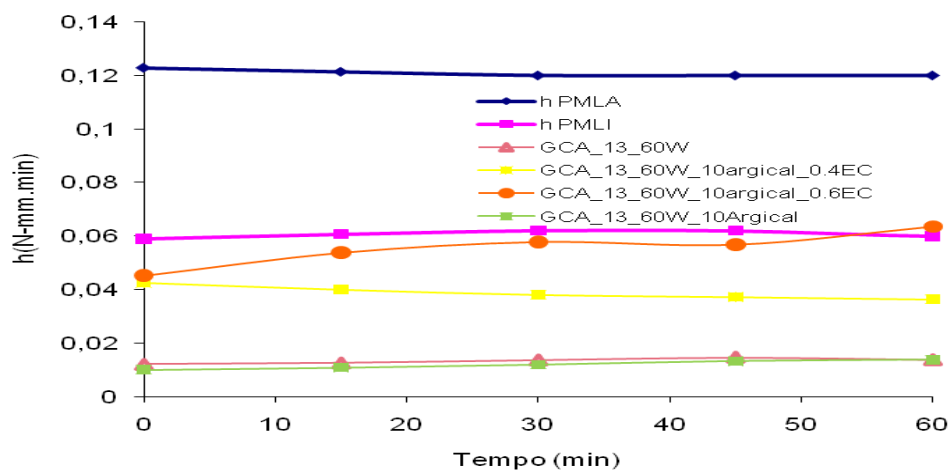


Figura 4.19- Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico h , em caldas de cal com 10% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).

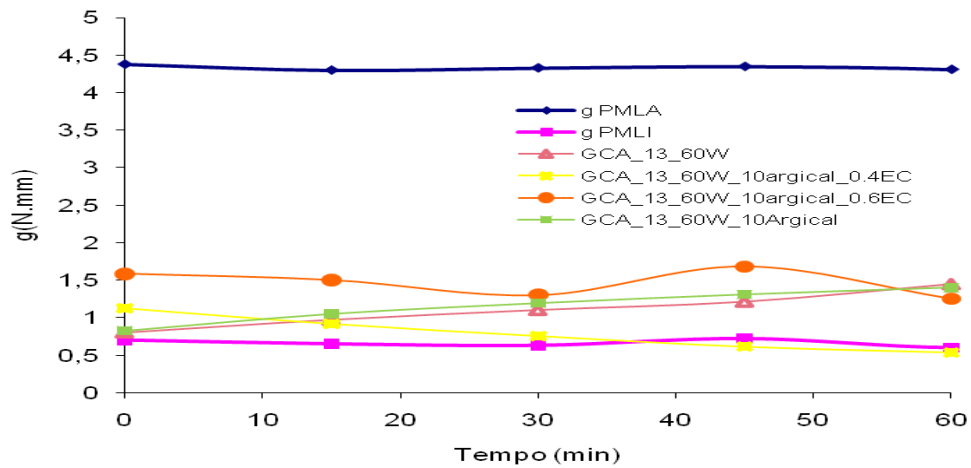


Figura 4.20 Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico g, em caldas de cal com 10% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).

À medida que se aumentam os teores em EC de 0,4 para 0,6, torna-se visível um aumento da viscosidade (h) e uma pequena variação dos valores da tensão de cedência (g).

Considerou-se a formulação mais favorável em termos dos limites dos *grouts* comerciais de comparação: GCA_13_60W_10Argical_0.6EC.

Nas figuras 4.21 e 4.22 avalia-se o efeito da substituição de parte da cal por 20% de metacaulino, sobre o efeito dos parâmetros reológicos h e g, respectivamente.

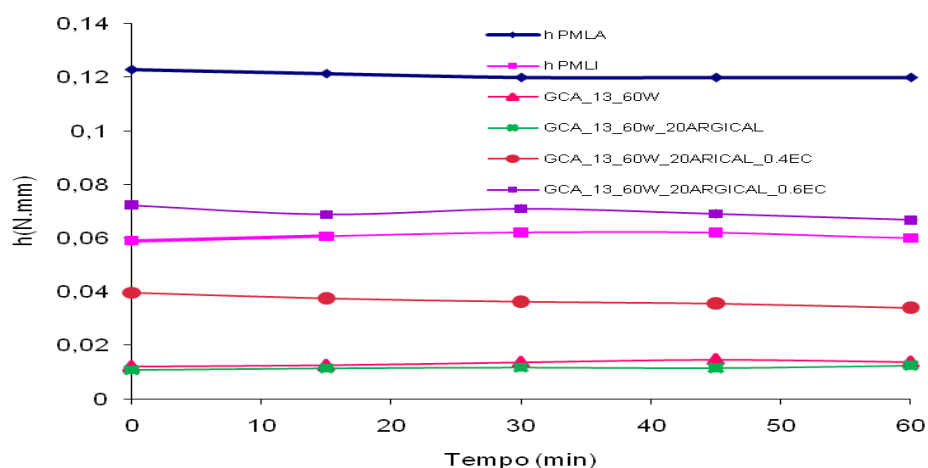


Figura 4.21- Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico h, em caldas de cal com 20% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).

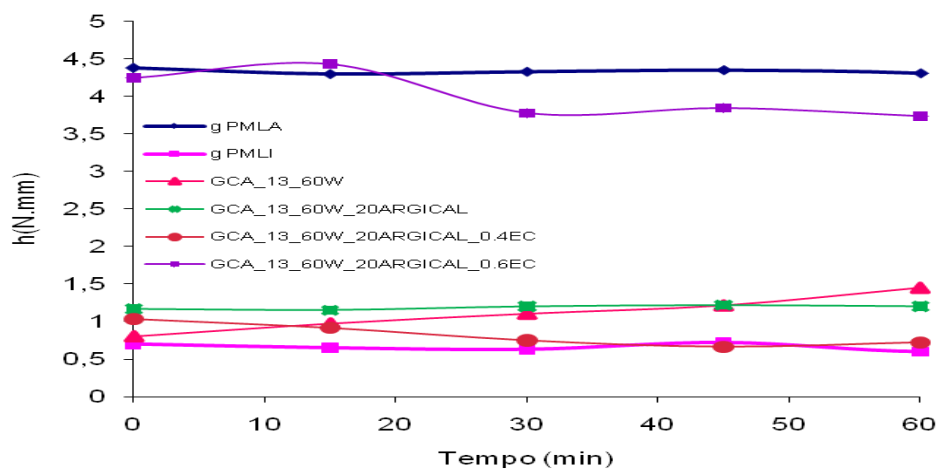


Figura 4.22 - Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico g, em caldas de cal com 20% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).

À medida que se aumenta a quantidade de éter de celulose introduzido é visível um aumento nos valores da viscosidade (h) e na tensão de cedência (ou g).

A formulação considerada mais favorável foi: GCA_13_60W_20Argical_0.6EC.

Nas Figuras 4.23 e 4.24 avalia-se o efeito da sua substituição de parte da cal por 30% de metacaulino, sobre os parâmetros reológicos h e g, respectivamente.

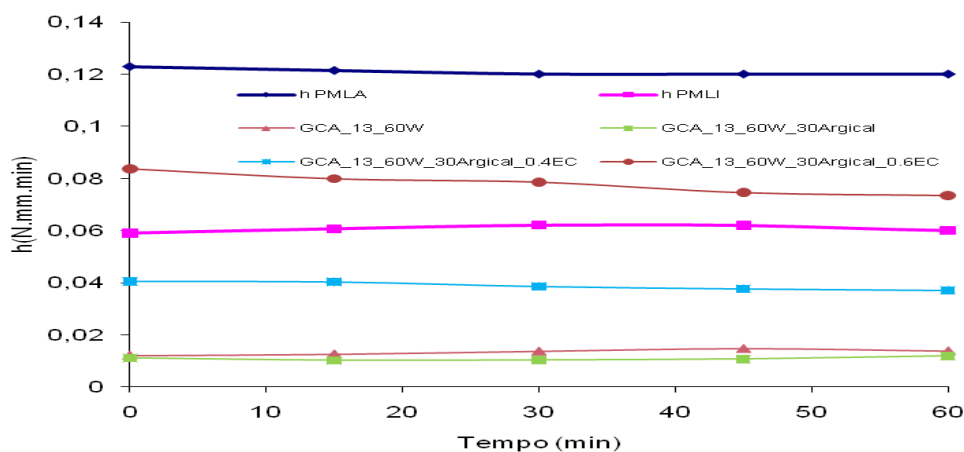


Figura 4.23 - Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico h, em caldas de cal com 30% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).

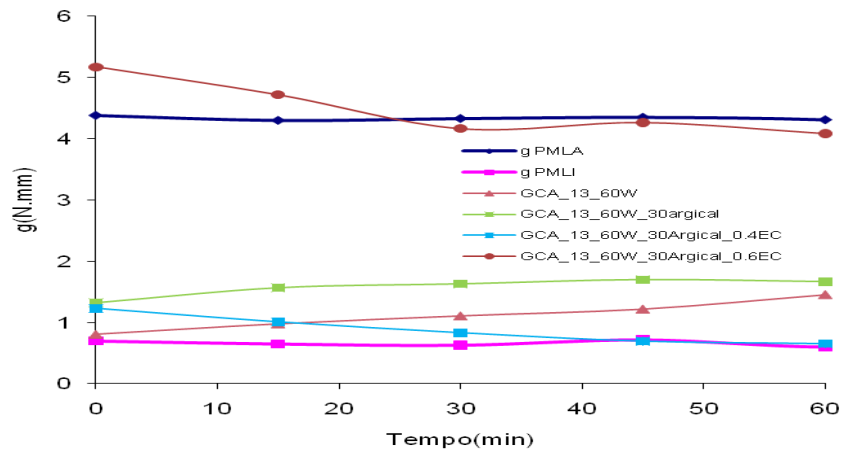


Figura 4.24 - Efeito do aumento do éter de celulose, EC, no parâmetro reológico g, em caldas de cal com 30% de metacaulino (em substituição do ligante/cal).

É notório, nas Figuras 4.23 e 4.24, que o aumento do teor em éter de celulose, reflecte-se num aumento dos valores da viscosidade e da tensão de cedência.

A formulação que se encontra nos limites pretendidos é GCA_13_60W_30Argical_0.6EC.

Nas figuras 4.25 e 4.26 pode observar-se a variação dos valores de h e g das pastas com variação dos teores de éter de celulose (EC) e mantendo sempre 1% do agente plastificante (GS - gluconato de sódio).

A introdução de gluconato de sódio colocou a viscosidade dentro dos parâmetros definidos pelos *grouts* comerciais embora tenha feito subir o valor de g consideravelmente (Figura 4.25 e 4.26).

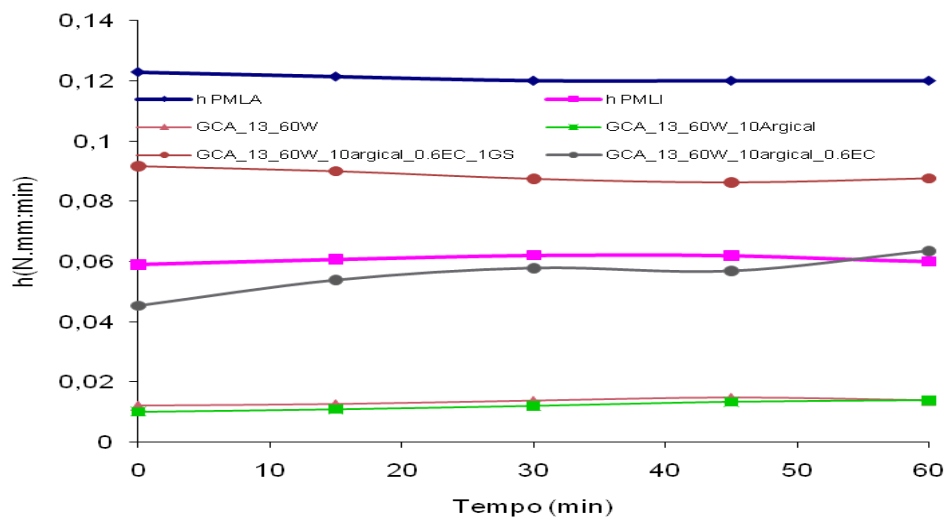


Figura 4.25 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio (GS) na calda de cal com escolhida, com 10% metacaulino GCA_13_60W_10argical_0.6EC, na viscosidade (h).

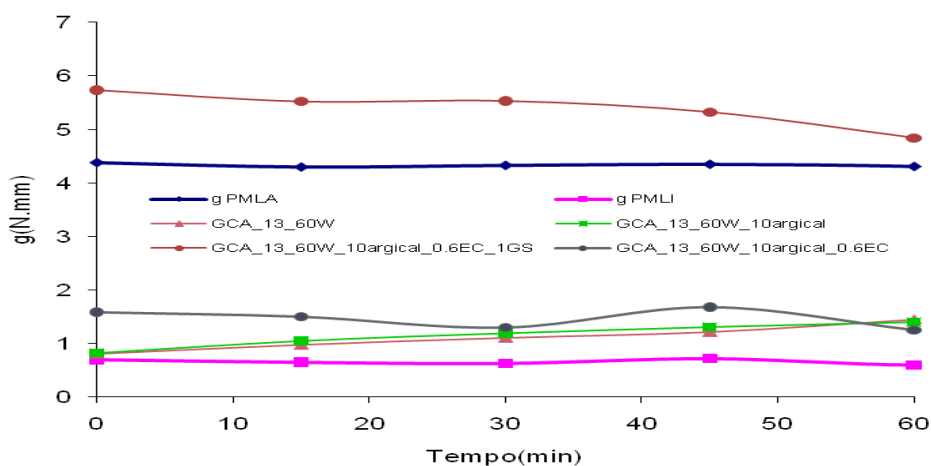


Figura 4.26 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio na calda de cal, com 10% metacaulino escolhida, GCA_13_60W_10argical_0.6EC, na tensão de cedência (g).

Nas figuras seguintes (Figura 4.27 e 4.28) vê-se a variação dos valores de h e g das pastas com variação dos teores em éter de celulose (EC) e mantendo sempre 1% do agente plastificante (GS- gluconato de sódio). À medida que se aumentam os teores em EC aumentam também os valores de h e g.

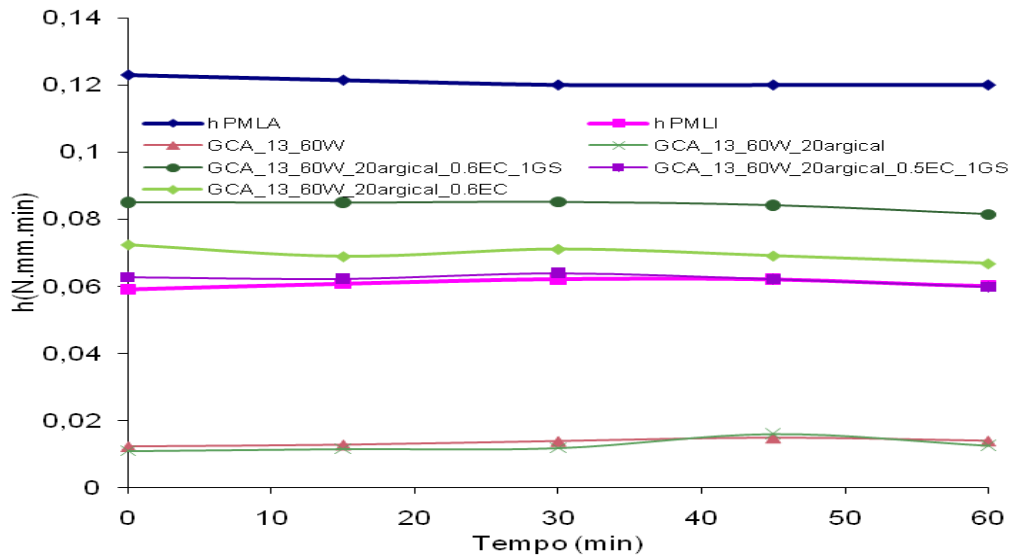


Figura 4.27 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio nas caldas de cal com 20% de metacaulino e 0,5EC e 0,6EC na viscosidade (h).

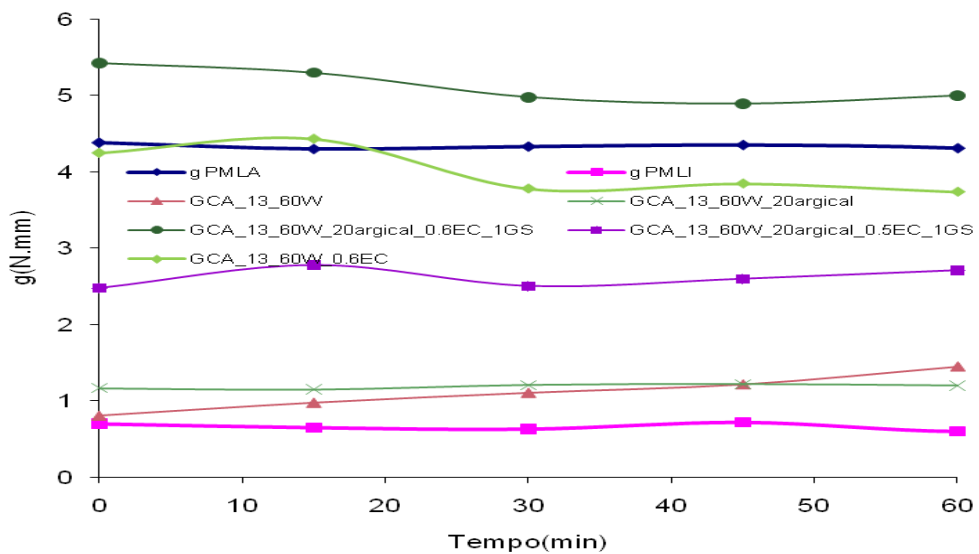


Figura 4.28 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio nas caldas de cal com 20% de metacaulino e 0,5EC e 0,6EC na tensão de cedência (g).

Comparando os valores de h e g dos diferentes *grouts* conclui-se que a composição as duas composições mais favoráveis são: GCA_13_20argical_0.5EC_1GS e GCA_13_20argical_0.6EC_1GS.

Nas figuras 4.29 e 4.30 pode-se observar a variação dos valores de h e g das pastas com variação dos teores em éter de celulose, EC, e mantendo sempre 1% do agente plastificante (GS - gluconato de sódio).

Verifica-se que à medida que se aumenta os teores em éter de celulose aumentam também os valores de h e g.

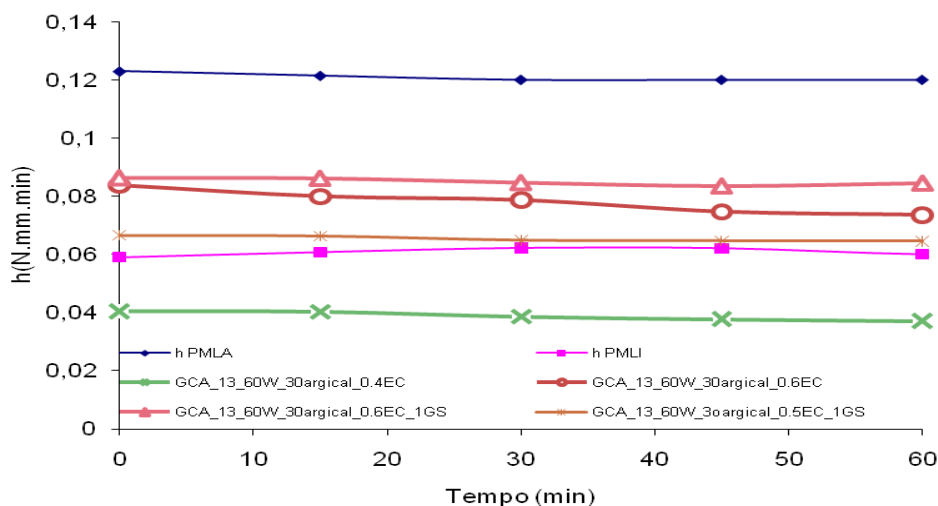


Figura 4.29 - Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio nas caldas de cal com 30% de metacaulino e 0,5EC e 0,6EC na viscosidade (h).

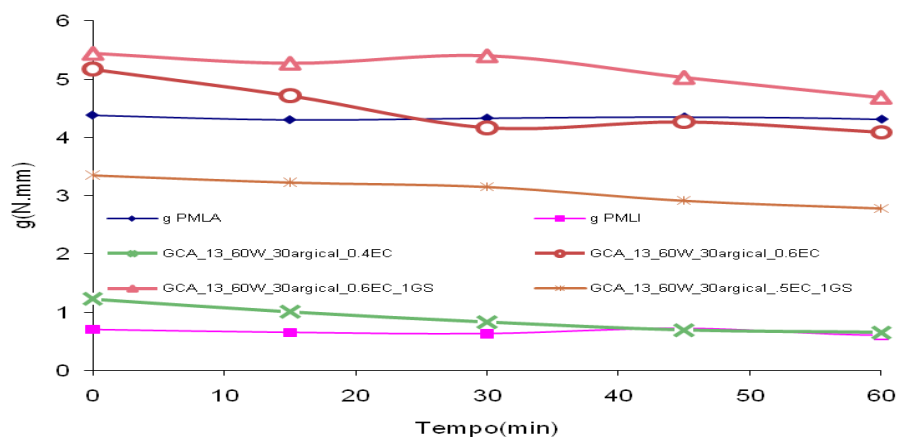


Figura 4.30- Efeito da introdução de 1% de gluconato de sódio nas caldas de cal com 30% de metacaulino e 0,5EC e 0,6EC na tensão de cedência (g)

Na Figura 4.30 verifica-se que o grout com composição GCA_13_60W_0.6EC_1GS se encontra ligeiramente acima do limite máximo da argamassa comercial de referência em relação aos valores de g (tensão de cedência).

Comparando os valores de h e g das diferentes *grouts* escolheu-se a composição GCA_13_60W_30argical_0.5EC_1GS, como sendo a ideal.

Após o estudo anterior, conclui-se que as caldas de cal que se encontram dentro dos parâmetros pretendidos são as que têm 0.6EC e 0.5EC, mas ao fazer a injeção dos *grouts* nos provetes de tijolo, a calda pareceu ainda um pouco viscosa. Daí ter-se optado por injectar também com 0,4EC, apesar dos valores da viscosidade estarem abaixo do limite mínimo estipulado (Figura 4.31).

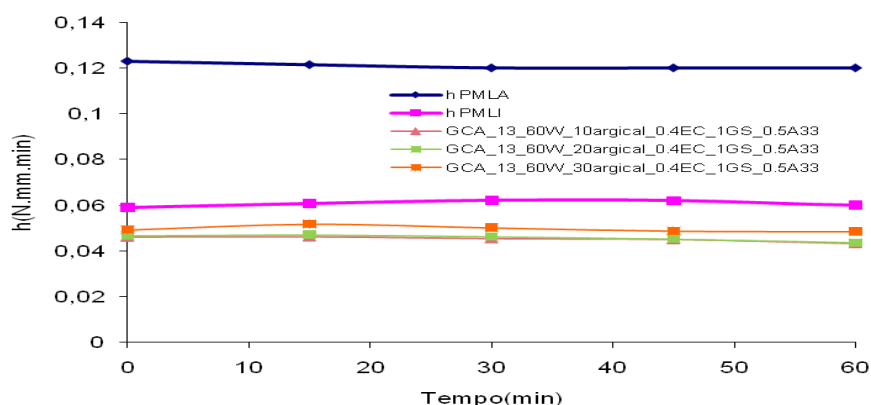


Figura 4.31- Efeito do teor em metacaulino, com 0,4EC, 1GS e 0,5A33 nos valores da viscosidade (h).

Em relação à tensão de cedência, os *grouts* representados na figura 4.32, encontram-se todos dentro dos parâmetros pretendidos, sendo a composição que mais se destaca a: GCA_13_60W_30argical_0.4EC_1GS_0.5A33.

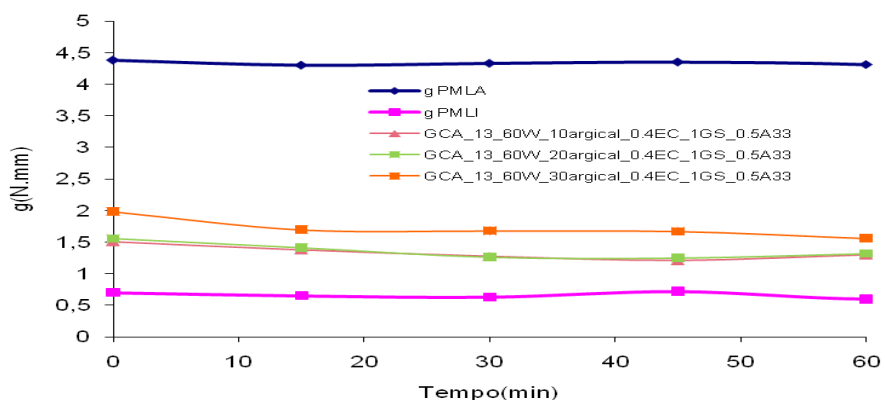


Figura 4.32 - Efeito do teor em metacaulino, com 0,4EC, 1GS e 0,5A33 nos valores da tensão de cedência (g).

O aumento da quantidade de metacaulino (argical 1200) aumenta os valores da viscosidade (h) e da tensão de cedência (g), mas essa distinção só é mais notória para a composição com 30% de argical (Figura 4.31 e 4.32).

Na Figura 4.33 comparam-se duas composições semelhantes com 20% em metacaulino, em que se altera apenas o teor de éter de celulose. Verifica-se, como esperado, que o aumento de éter de celulose aumenta o valor de h e de g.

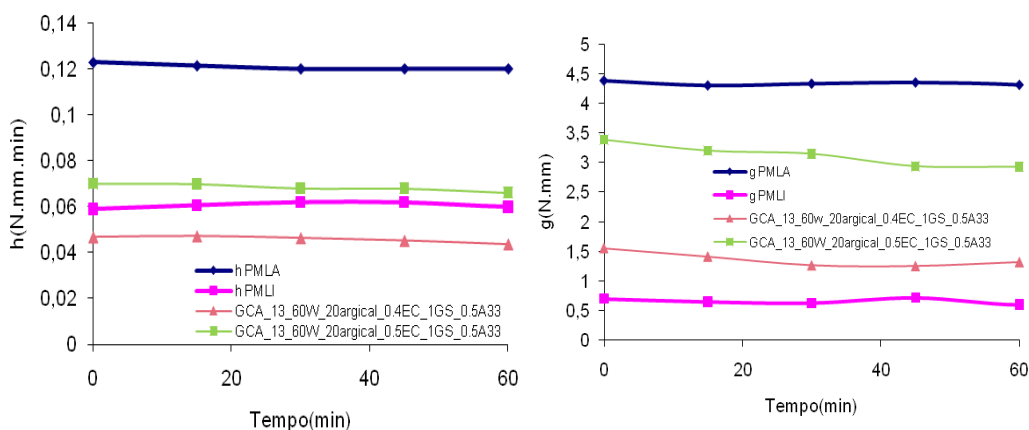


Figura 4.33 - Comportamento reológico, h e g, das caldas de cal que vão ser usadas para injeção, com 20% de metacaulino.

Na figura 4.34, compara-se o comportamento reológico, h e g, para dois grouts com composições semelhantes, onde varia apenas o teor em éter de celulose. Estas composições serão injectadas nos provetes de tijolos.

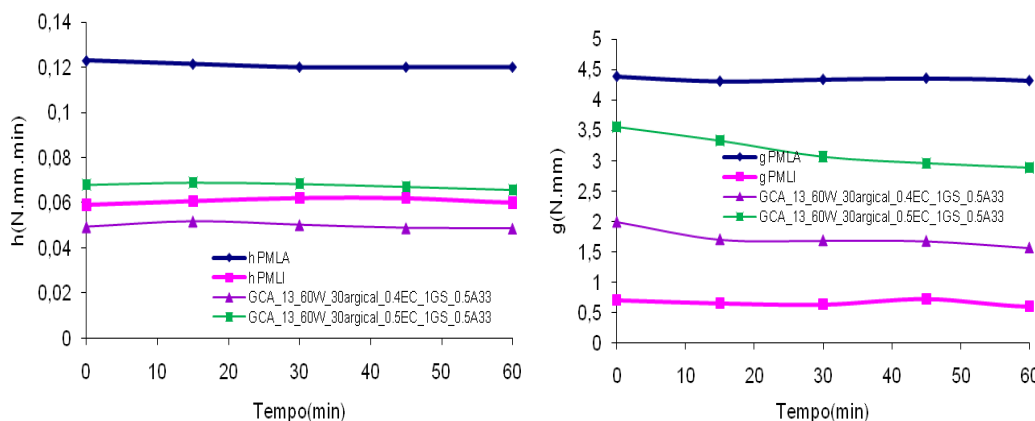


Figura 4.34 - Comportamento reológico, h e g, das caldas de cal que vão ser usadas par injeção, com 30% de metacaulino.

4.4.2 Caldas de cal com diatomite

Na Figura 4.35 verifica-se o efeito do aumento do teor em éter de celulose, nos parâmetros h e g , em *grouts* em que se substituiu a cal por 10% de diatomite.

À medida que se aumenta os teores em éter de celulose aumentam os valores da viscosidade (h) e da tensão de cedência (g). Em relação à viscosidade os três *grouts* encontram-se dentro dos limites estipulados. Em relação à tensão de cedência, tal já não acontece e o *grout*, GCA_13_60W_10Dia_0.6EC_1GS_0.5A33 apresenta um valor bastante acima do limite máximo da argamassa comercial de referência; daí ter sido excluído para injeção.

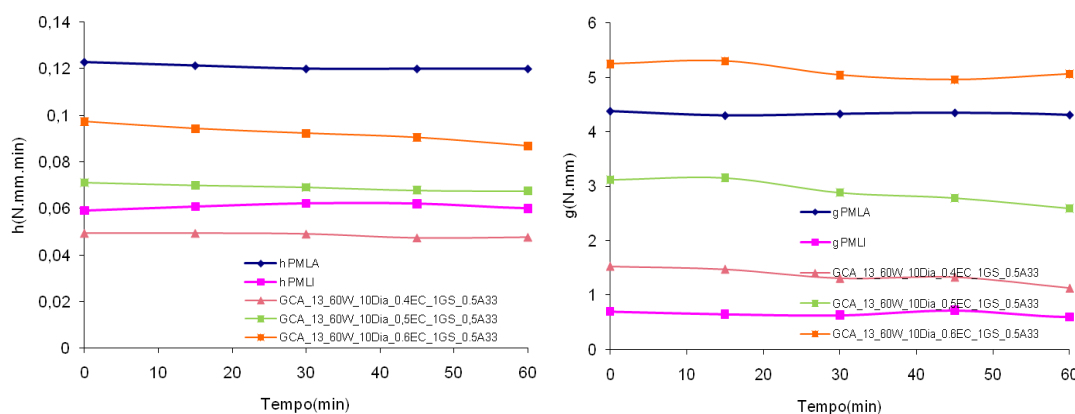


Figura 4.35 - Comportamento reológico, h e g , das caldas de cal que vão ser usadas par injeção, com 10% de diatomite.

As composições escolhidas para se proceder ao enchimento dos provetes prismáticos e à injeção nos provetes de tijolos foram:

- GCA_13_60W_10Dia_0.4EC_1GS_0.5A33 que apesar de ter o valor da viscosidade (h) ligeiramente abaixo do limite mínimo desejado, parece uma boa solução.
- GCA_13_60W_10Dia_0.5EC_1GS_0.5A33 que se encontra dentro dos limites estipulados (Figura 4.35).

Na Figura 4.36 vê-se o comportamento reológico dos parâmetros h e g de três composições com 20% de diatomite. Os valores são bastante aceitáveis, apenas se excluindo a

composição GCA_13_60W_0.6EC_1GS_0.5A33, porque o valor da tensão de cedência excede bastante o valor limite estipulado.

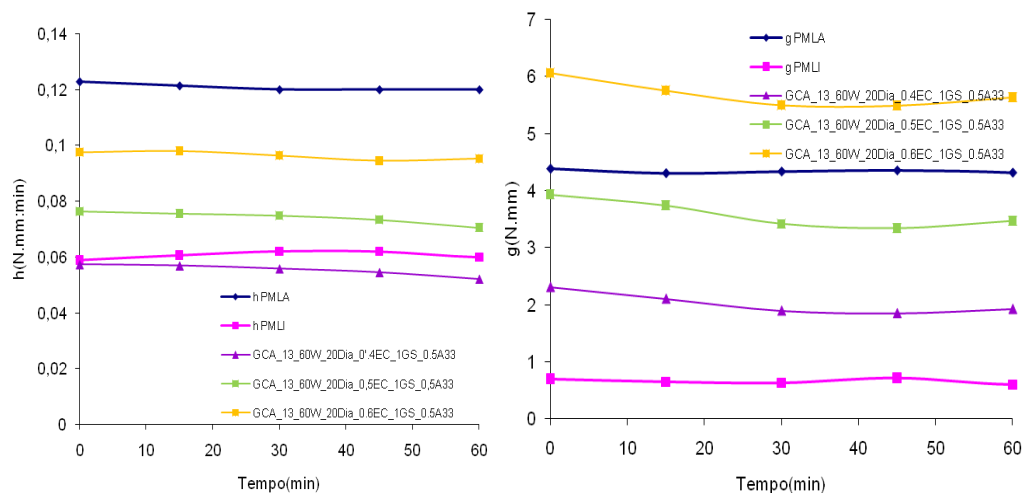


Figura 4.36 - Comportamento reológico, h e g , das caldas de cal que vão ser usadas para injeção, com 20% de diatomite.

As composições escolhidas para se proceder ao enchimento dos provetes prismáticos e à injeção nos provetes de tijolos foram:

- GCA_13_60W_20Dia_0.4EC_1GS_0.5A33;
- GCA_13_60W_20Dia_0.5EC_1GS_0.5A33.

Apesar da composição GCA_13_60W_20Dia_0.4EC_1GS_0.5A33 apresentar valores de viscosidade abaixo do limite mínimo estipulado, em termos práticos ela funciona.

Na figura 4.37 encontra-se o comportamento reológico, h e g , das caldas de cal para injeção, com substituição do ligante por 30% de diatomite. A calda de cal com composição GCA_13_60W_0.6EC_1GS_0.5A33 foi imediatamente excluída por ter valores de tensão de cedência muito elevados. Os outros *grouts*, com teores de 0,4 e 0,5EC (éter de celulose), apresentam valores de viscosidade (h) e de tensão de cedência (g) muito idênticos.

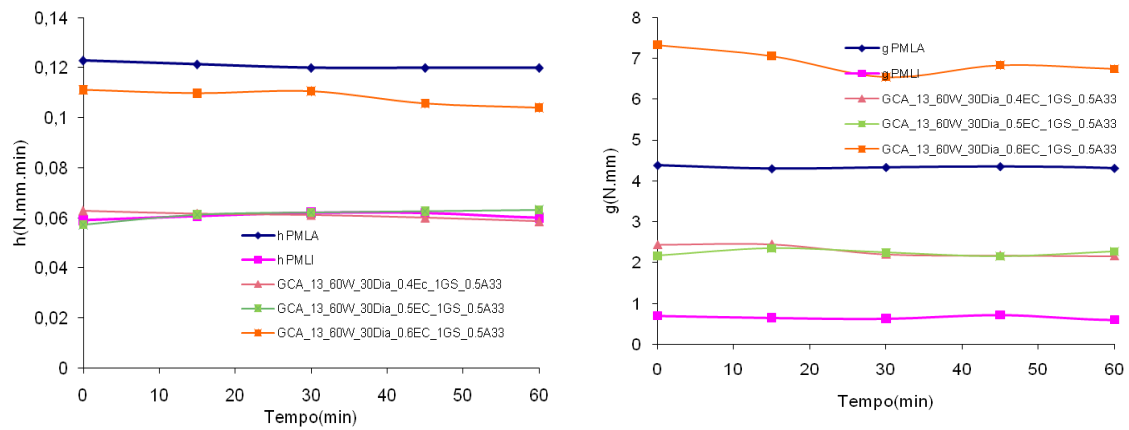


Figura 4.37 - Comportamento reológico, h e g , das caldas de cal que vão ser usadas por injeção, com 30% de diatomite.

As caldas de cal com 30% de diatomite usadas para a injeção dos provetes de tijolo foram:

- GCA_13_60W_30Dia_0.4EC_1GS_0.5A33;
- GCA_13_60W_30Dia_0.5EC_1GS_0.5A33.

4.4.3 Caldas de cal usadas nos ensaios mecânicos

Resumindo, as composições escolhidas para ensaios de consolidação e para os provetes prismáticos encontram-se na tabela seguinte (Tabela 4.1).

Tabela 4.1- Composições escolhidas para a injeção dos provetes de tijolo e para a preparação dos provetes prismáticos.

Composição dos <i>grouts</i> para injeção	Composição dos <i>grouts</i> para provetes prismáticos
GCA_13_60W_10Argical_0.4EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_10Argical_0.4EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_10Argical_0.5EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_10Argical_0.5EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_20Argical_0.4EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_20Argical_0.4EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_20Argical_0.5EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_20Argical_0.5EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_30Argical_0.4EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_30Argical_0.4EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_30Argical_0.5EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_30Argical_0.5EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_10Diatomite_0.5EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_10Diatomite_0.5EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_20Diatomite_0.5EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_20Diatomite_0.5EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_30Diatomite_0.4EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_30Diatomite_0.4EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_30Diatomite_0.5EC_1GS_0.5A33	GCA_13_50W_30Diatomite_0.5EC_1GS_0.5A33

Como referido anteriormente, e resumindo, o aperfeiçoamento das caldas de cal realizou-se avaliando o efeito de alguns adjuvantes e de alguns aditivos sobre o comportamento reológico. Usando o reómetro Viskomat (específico para argamassas), foi possível determinar as curvas de fluxo (torque em função da velocidade de corte). Estas curvas permitiram concluir que estávamos na presença dum fluido binghamiano. Adequa-se ao modelo de Bingham, calculou-se a tensão de cedência e a viscosidade plástica das caldas de cal, a partir das curvas de fluxo em regime de velocidade descendente. A partir destas

curvas de torque em função do tempo para os adjuvantes estudados, foi possível desenvolver 10 composições distintas de pastas de cal.

4.5 Ensaios de consolidação de revestimentos

4.5.1 Ensaios para verificar o tempo de propagação no *grout* e no reboco envolvente, usando a PUNDIT.

A tabela 4.2 mostra o tempo de propagação no *grout* e no reboco envolvente, usando uma PUNDIT.

Tabela 4.2- Tempo de propagação no *grout* e no reboco envolvente, usando uma Pundit.

Amostra	Sítio	Tempo (μ s)
GCA_13_60W_10Arg_0.4EC_1GS_0,5A33(estufa)	<i>grout</i>	46
	reboco	68
GCA_13_60W_10Arg_0.4EC_1GS_0,5A33 (c. molhagem)	<i>grout</i>	49
	reboco	54
GCA_13_60W_20Arg_0.4EC_1GS_0,5A33 (estufa)	<i>grout</i>	35
	reboco	48
GCA_13_60W_20Arg_0.4EC_1GS_0,5A33 (c molhagem)	<i>grout</i>	72
	reboco	67
GCA_13_60W_20Arg_0.5EC_1GS_0,5A33 (estufa)	<i>grout</i>	44
	reboco	68
GCA_13_60W_20Arg_0.5EC_1GS_0,5A33 (c molhagem)	<i>grout</i>	46
	reboco	59
GCA_13_60W_30Arg_0.4EC_1GS_0,5A33(estufa)	<i>grout</i>	43
	reboco	71
GCA_13_60W_30Arg_0.4EC_1GS_0,5A33 (c. molhagem)	<i>grout</i>	47
	reboco	65
GCA_13_60W_30Arg_0.5EC_1GS_0,5A33 (estufa)	<i>grout</i>	44
	reboco	69
GCA_13_60W_30Arg_0.5EC_1GS_0,5A33 (c. molhagem)	<i>grout</i>	42
	reboco	54
GCA_13_60W_10Dia_0.5EC_1GS_0,5A33 (estufa)	<i>grout</i>	42
	reboco	69
GCA_13_60W_10Dia_0.5EC_1GS_0,5A33 (c. molhagem)	<i>grout</i>	76
	reboco	54
GCA_13_60W_20Dia_0.5EC_1GS_0,5A33 (estufa)	<i>grout</i>	35
	reboco	40
GCA_13_60W_30Dia_0.4EC_1GS_0,5A33 (estufa)	<i>grout</i>	44
	reboco	65

De uma maneira geral, analisando a tabela 4.2, verifica-se que o *grout* apresenta menores tempos de propagação que o reboco correspondente ao mesmo provete ensaiado, o que poderá corresponder ao facto da argamassa com *grout* ser mais compacta do que a respectiva argamassa do reboco. O reboco poderá ter mais zonas de vazios, fendas e fissuras.

4.5.2 Ensaios de permeabilidade à água sob baixa pressão (tubos de Karsten)

Neste ensaio realizaram-se medições da capacidade de absorção capilar dos provetes de tijolos, em duas zonas distintas, uma só com argamassa base e a outra na zona onde se injectou o *grout*. Para cada composição temos dois valores distintos, uma vez que temos provetes de tijolo que estiveram numa estufa condicionada a 21 °C e 65% Hr e outros estiveram à temperatura ambiente e durante 2 meses foram sujeitos a ciclos de molhagem 3 a 4 vezes/dia.

Da Figura 4.38 à Figura 4.43 comparam-se os valores de absorção de água a baixa pressão para diversas composições ensaiadas em dois provetes distintos. Um dos provetes manteve-se numa estufa a temperatura e humidade relativa controlada enquanto o outro provete esteve à temperatura ambiente e sujeito a ciclos de molhagem, três a quatro vezes ao dia, durante meses. E realmente é notória a diferença entre os resultados obtidos em cada provete, independentemente da composição.

Na Figura 4.44 e 4.45 comparam-se os valores de absorção de água a baixa pressão entre a zona do *grout* e a do reboco, para duas composições distintas, mas apenas num só provete, que esteve na estufa.

Na Figura 4.38, comparando a zona de argamassa de reboco dos dois provetes, no que esteve sujeito a ciclos de molhagem a absorção é menor do que aquele que esteve na estufa. Isto significa que o primeiro apresenta menor porosidade. Em relação ao *grout* a conclusão é semelhante, o *grout* cujo provete esteve sujeito a ciclos de molhagem apresenta uma menor absorção de água. Comparando as zonas de *grout* e de reboco do provete que esteve na estufa, o reboco apresenta uma absorção mais rápida do que o respectivo *grout*, o que significa que o *grout* é mais compacto e apresenta menos porosidade.

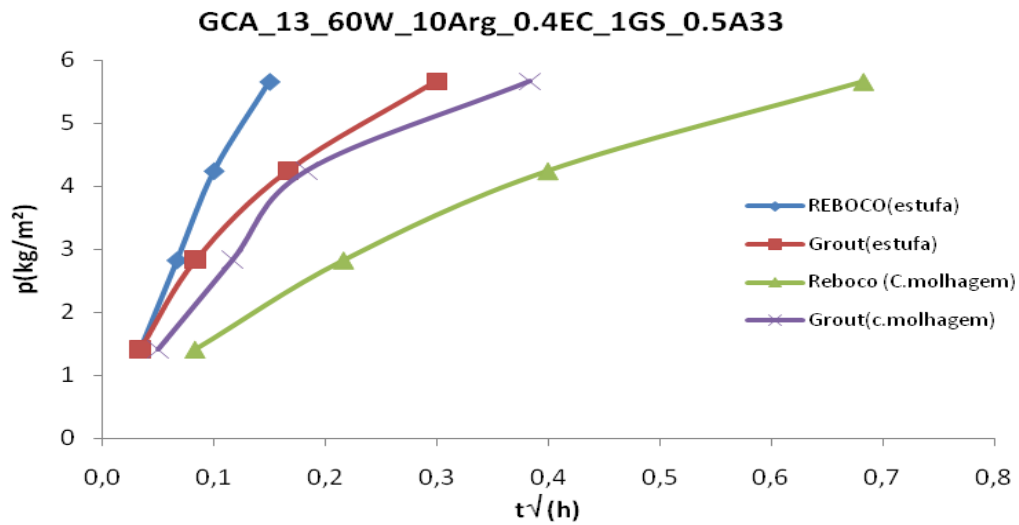


Figura 4.38 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.

Na Figura 4.39 as duas amostras de reboco, com e sem molhagem apresentam um comportamento muito semelhante entre si. Se se comparar a argamassa do reboco com o grout, conclui-se que para esta composição (GCA_13_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33), os grouts absorvem mais rapidamente do que as respectivas argamassas de reboco, sendo portanto neste caso os grouts menos compactos e apresentando mais zonas de vazios.

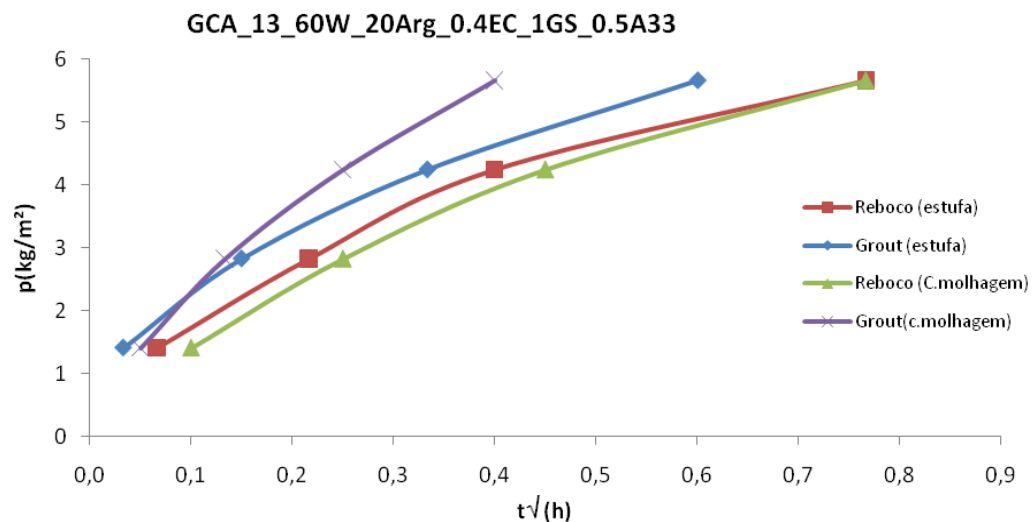


Figura 4.39 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.

Na Figura 4.40 comparando os provetes com e sem ciclos de molhagem o comportamento é muito semelhante. Em relação ao provete com composição GCA_13_60W_20Arg_0.5EC_1GS_0.5A33, conclui-se que o *grout* apresenta maior capacidade de absorção de água do que o respectivo reboco.

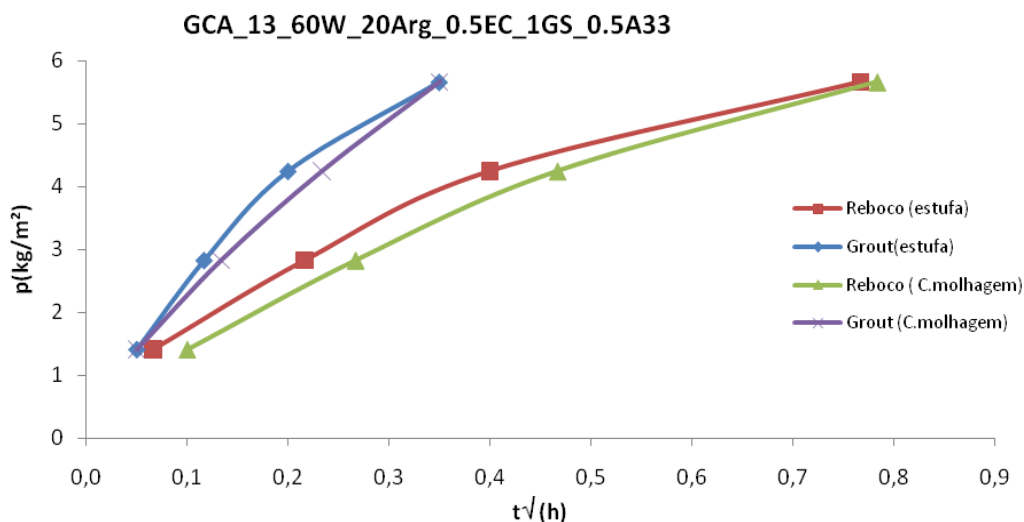


Figura 4.40 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do *grout* GCA_13_60W_20Arg_0.5EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.

Na Figura 4.41 verifica-se que em relação aos provetes com e sem ciclo de molhagem o comportamento do reboco é muito semelhante. Comparando a zona do grout com o respectivo reboco, no provete com composição GCA_13_60W_30Arg_0.4EC_1GS_0.5A33, que esteve na estufa, verifica-se que o *grout* apresenta uma menor absorção de água, sendo por isso mais compacto, apresentando menos porosidade. Em relação ao provete com ciclo de molhagem acontece precisamente o contrário, o *grout* absorve mais rapidamente do que a argamassa de reboco respectiva.

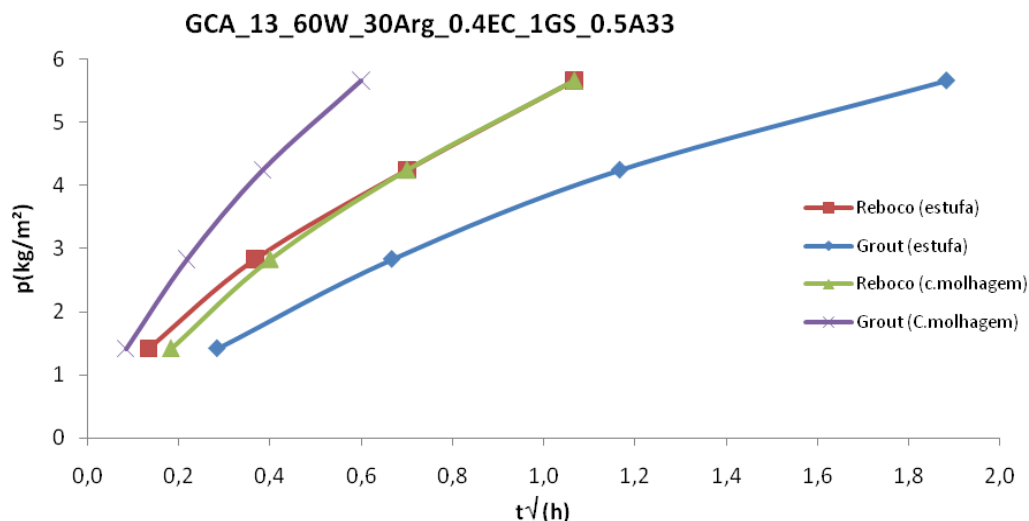


Figura 4.41- Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_30Arg_0.4EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.

Na Figura 4.42, para provetes com composição GCA_13_60W_30Arg_1GS_0.5A33, em relação ao provete com ciclos de molhagem, o *grout* e o reboco respectivo apresentam uma evolução muito semelhante, a velocidade de absorção de água é lenta, o que significa que são pouco porosos. No provete que esteve na estufa, o reboco apresenta uma menor capacidade de absorção de água em relação à do *grout*, o que significa que este último é mais poroso e absorve a água mais rapidamente.

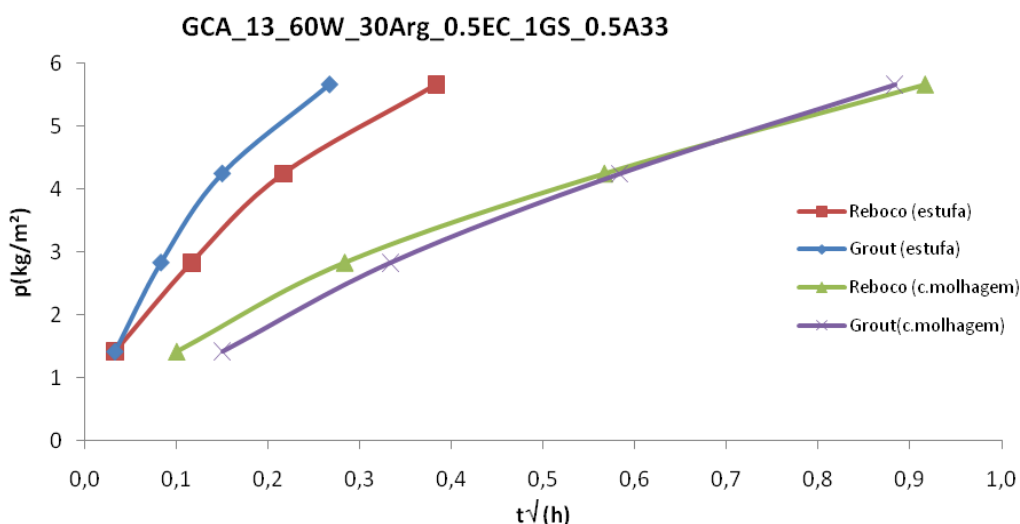


Figura 4.42 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do *grout* GCA_13_60W_30Arg_0.5EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.

Na Figura 4.43 verifica-se que em ambos os provetes com composição GCA_13_60W_10Dia_0.5EC_1GS_0.5A33 a absorção é menor onde existe a calda de injeção (*grout*), do que nos respectivos rebocos. Isto significa que o *grout* apresenta menor porosidade do que a argamassa base.

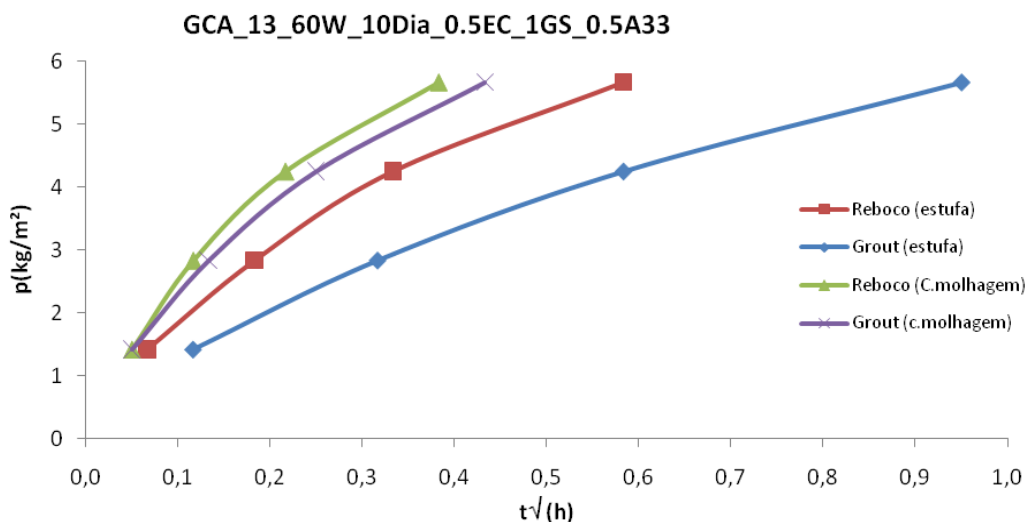


Figura 4.43- Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_10Dia_0.5EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.

Na Figura 4.44, verifica-se que no provete com composição GCA_13_60W_20Dia_0.5EC_1GS_0.5A33 a argamassa do reboco apresenta uma absorção de água menor do que a do respectivo *grout*, sendo portanto o *grout* mais poroso.

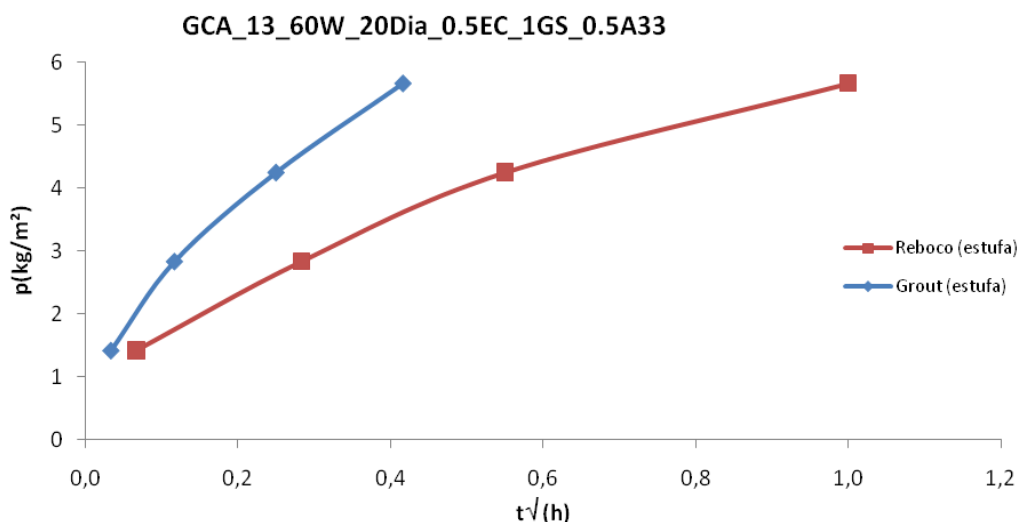


Figura 4.44 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do grout GCA_13_60W_20Dia_0.5EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.

Na Figura 4.45, verifica-se que no provete com composição GCA_13_60W_30Dia_0.4EC_1GS_0.5A33, o *grout* apresenta uma capacidade de absorção de água menor do que a do respectivo reboco. O *grout* apresenta portanto uma menor porosidade do que a argamassa de reboco.

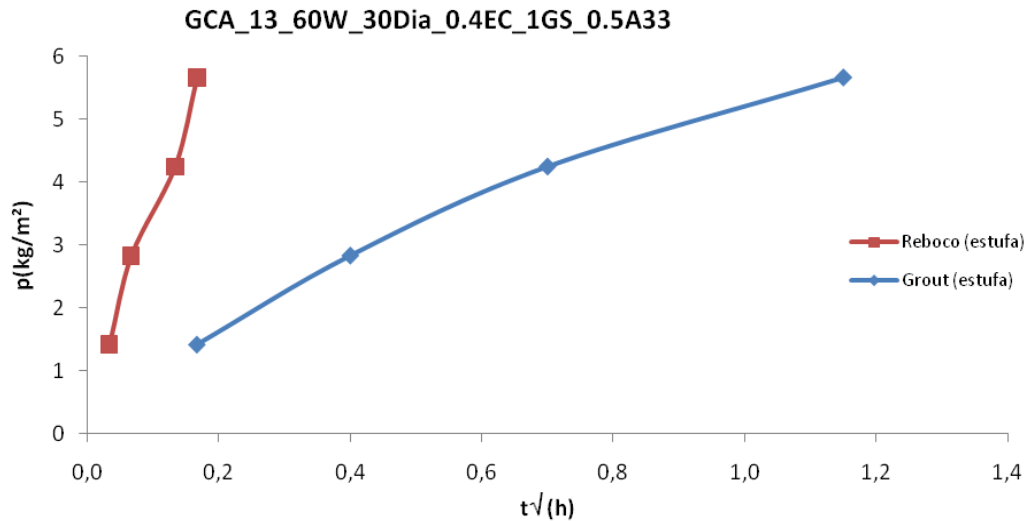


Figura 4.45 - Ensaio de absorção de água a baixa pressão do *grout* GCA_13_60W_30Dia_0.4EC_1GS_0.5A33 e da argamassa de reboco do respectivo provete.

4.5.3 Ensaios de aderência no *grout* e no reboco

As amostras ensaiadas encontram-se descritas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Amostras onde se realizou o ensaio de aderência nos provetes de tijolos.

Amostra
GCA_13_60W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_20Arg_0.5EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_30Arg_0.5EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_20Dia_0.5EC_1GS_0.5A33
GCA_13_60W_30Dia_0.4EC_1GS_0.5A33

Neste ensaio, que visa medir a resistência ao arrancamento dos *grouts* e do reboco respectivo, não foi possível obter valores quantificáveis para a resistência ao arrancamento.

A seguir é feita uma análise qualitativa do teste de aderência para cada composição assinalada na tabela 4.3. O reboco do tijolo foi feito há cinco meses e o grout têm 60 dias.

De maneira a facilitar a descrição da zona de ruptura do grout e do reboco, na figura 4.46 seguinte apresenta-se um esquema onde se descreve e enumera as diversas interfaces.

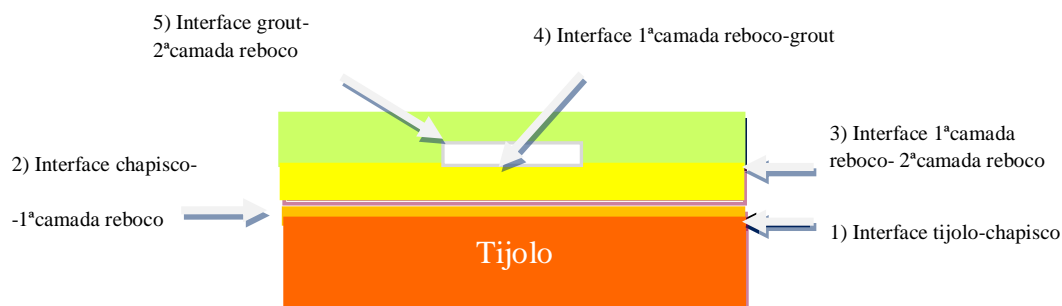


Figura 4.46 - Esquema descritivo do tijolo, onde se descreve as diversas interfaces existentes



Figura 4.47 - Ensaio de aderência no grout e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33.

Na figura 4.47 apresentam-se algumas fotografias que permitem visualizar o aspecto final do teste de aderência na amostra com composição GCA_13_60W_0.4EC_1GS_0.5A33. No reboco a rotura deu-se por arrancamento na interface 2) chapisco-1ªcamada reboco, enquanto que, na zona do *grout* a rotura foi mista e deu-se na interface 5) *grout* - 2ªcamada reboco. Nota-se aderência entre o reboco e o *grout*.

Na figura 4.48 apresentam-se algumas das fotografias representativas do resultado final do teste de aderência na amostra com composição GCA_13_60W_20Arg_0.5EC_1GS_0.5A33. No reboco a ruptura deu-se pela interface 1) chapisco-1ªcamada do reboco. Enquanto que, na zona do *grout*, a rotura deu-se pela interface 5) *grout*-2ªcamada reboco. Aparentemente não houve aparentemente grande carbonatação no interior do *grout*. Embora seja visível a carbonatação no topo do tijolo (ver a primeira fotografia da figura 4.48), por onde se injectou a calda de cal. A área encontra-se bastante compacta e dura, o que poderá ter dificultado a passagem de dióxido de carbono para o interior.



Figura 4.48 - Ensaio de aderência no grout e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_20Arg_0.5EC_1GS_0.5A33.

Na figura 4.49 apresentam-se algumas fotografias representativas do teste de aderência realizado na amostra com composição GCA_13_60W_30Arg_0.4EC_1GS_0.5A33. No reboco a rotura deu-se pela interface 2) chapisco-1ªcamada de reboco. Na zona do grout a rotura foi na interface 5) *grout*-2ªcamada reboco. Aparentemente também não houve muita carbonatação na zona interior do grout. Foi visível uma baixa aderência entre as camadas de *grout* e reboco.



Figura 4.49 - Ensaio de aderência no grout e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_30Arg_0.4EC_1GS_0.5A33

Na figura 4.49 apresentam-se algumas fotografias representativas do teste de aderência realizado na amostra com composição GCA_13_60W_30Arg_0.4EC_1GS_0.5A33. No reboco a rotura deu-se pela interface 2) chapisco-1ªcamada de reboco. Na zona do *grout* a rotura foi na interface 5) grout-2ªcamada reboco. Aparentemente também não houve muita carbonatação na zona interior do *grout*. Foi visível uma baixa aderência entre as camadas de grout e reboco.



Figura 4.50 - Ensaio de aderência no grout e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_20Dia_0.5EC_1GS_0.5A33

Na Figura 4.50 apresentam-se algumas fotografias representativas do teste de aderência realizado na amostra com composição GCA_13_60W_20Dia_0.5EC_1GS_0.5A33. No reboco a rotura deu-se por arrancamento na interface 3) 1ªcamada reboco-2ªcamada reboco. Na zona do *grout* notou-se pouca aderência sendo a rotura logo na interface 5) *grout*-2ªcamada reboco.



Figura 4.51 - Ensaio de aderência no *grout* e no reboco na amostra com composição GCA_13_60W_30Dia_0.4EC_1GS_0.5A33

Na Figura 4.51 apresentam-se algumas fotografias representativas do teste de aderência realizado na amostra com composição GCA_13_60W_30Dia_0.4EC_1GS_0.5A33. No reboco o arrancamento deu-se pela interface 2) chapisco-1ªcamada reboco. Na zona do *grout* a rotura foi mista. Nota-se aderência entre o *grout* e a 1ªcamada do reboco. A rotura deu-se na interface 5) *grout*-2ªcamada de reboco.

4.6 Características físicas dos grouts

4.6.1 Retracção livre

A medição das variações livres é representativa da retracção que ocorre em cada provete. Como os provetes prismáticos estavam ligeiramente tortos, decidiu-se usar uns moldes circulares e colocar lá a calda de cal. Após desmoldagem aos 30 dias mediu-se a retracção livre das argamassas.

Na tabela 4.4 mostra-se os valores de retração livre nos diâmetros das argamassas contendo 50% de água.

Todas as composições tiveram retracções inferiores a 6%. O método poderá não ser totalmente eficaz, uma vez que para a mesma composição os valores por vezes diferem bastante, o que não deveria acontecer. Na altura da realização do trabalho não havia moldes suficientes e em vez de se fazer 3 moldes por composição acabou-se por fazer apenas 2. O que não é claramente suficiente e é um ponto a ter em consideração para trabalhos futuros.

Tabela 4.4- Valores de retração livre nos diâmetros de argamassas contendo 50% de água.

Composição Amostra	Retracção	Alterações visíveis (%)
GCA_13_45W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	sem retração e sem fissuras	0
GCA_13_50W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	fissurou ao centro	1,4
GCA_13_50W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	sem fissuras	1,4
GCA_13_50W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	fissurou na parte de cima da amostra	2,9
GCA_13_50W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	sem fissuras	1,4
GCA_13_50W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	sem fissuras	4,3
GCA_13_50W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	fissurou ao centro da amostra (na parte da frente e na parte de trás)	2,9
GCA_13_50W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	fissurou na parte de cima e na parte de trás da amostra	2,9
GCA_13_50W_10Arg_0.4EC_1GS	sem fissuras	1,4
GCA_13_50W_10Arg_0.4EC_1GS	sem fissuras	1,4
GCA_13_50W_10Arg_0.5EC_1GS_0.5A33	sem fissuras	2,9
GCA_13_50W_10Arg_0.5EC_1GS_0.5A33	com fissuras na parte de cima da amostra	5,7
GCA_13_50W_20Arg_0.5EC_1GS_0.5A33	fissurou na parte de baixo da amostra	5,7
GCA_13_50W_20Arg_0.5EC_1GS_0.5A33	sem fissuras	4,3
GCA_13_50W_30Arg_0.5EC_1GS_0.5A33	Fissurou na parte de cima e na parte de trás da amostra	2,9
GCA_13_50W_30Arg_0.5EC_1GS_0.5A33	sem fissuras	1,4

Na Figura 4.52 apresentam-se exemplos de provetes após a desmoldagem.

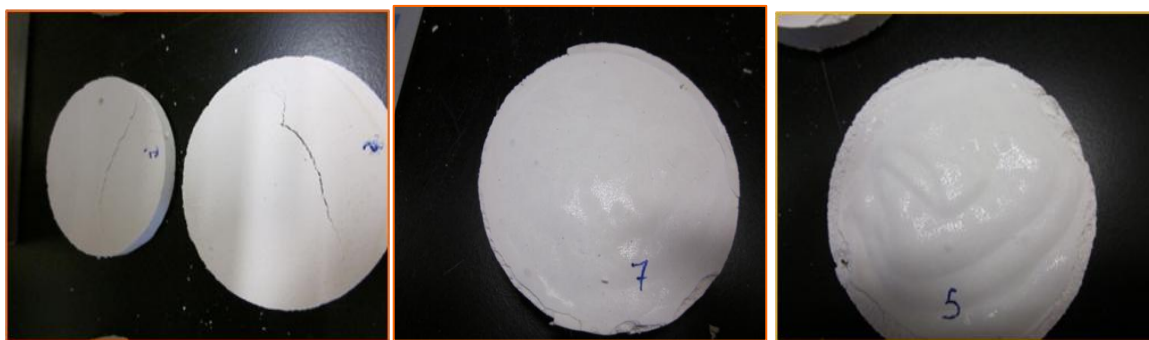


Figura 4.52 - Exemplos de provetes circulares após desmoldagem.

A composição que apresentou melhores resultados, bastantes coerentes, foi a GCA_13_50W_10Arg_0.4EC_1GS, que não fissurou e teve uma retracção de 1,4%. Esta composição não contém o agente adesivo acril33. A presença do agente adesivo (A33) provoca um ligeiro aumento na retracção.

4.6.2 Resistência mecânica

Os ensaios mecânicos foram feitos aos 28 dias de idade das amostras.

As argamassas de cal apresentam valores no intervalo compatível com o revestimento de edifícios. Segundo Veiga [Veiga, 2003], a resistência à flexão deve estar compreendida entre 0,2 e 0,7MPa; e a resistência à compressão deve estar compreendida entre 0,4 e 2,5 MPa. Não se conseguiram medir todas as amostras, uma vez que algumas ao retrair partiram e não possuíam o comprimento mínimo de 10 cm, para ser possível a realização do ensaio.

Nas Figuras 4.52 e 4.53 apresentam-se dois gráficos gerais, englobando todas as composições testadas, o primeiro referente à resistência à flexão e o segundo em relação à resistência à compressão.

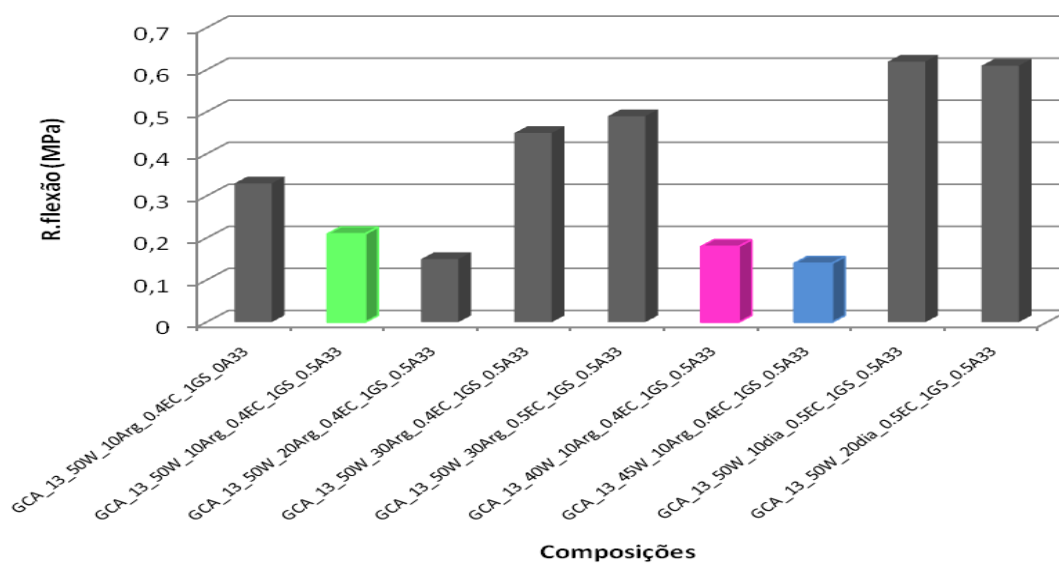


Figura 4.53 - Resistência à flexão dos provetes prismáticos aos 28 dias - quadro geral.

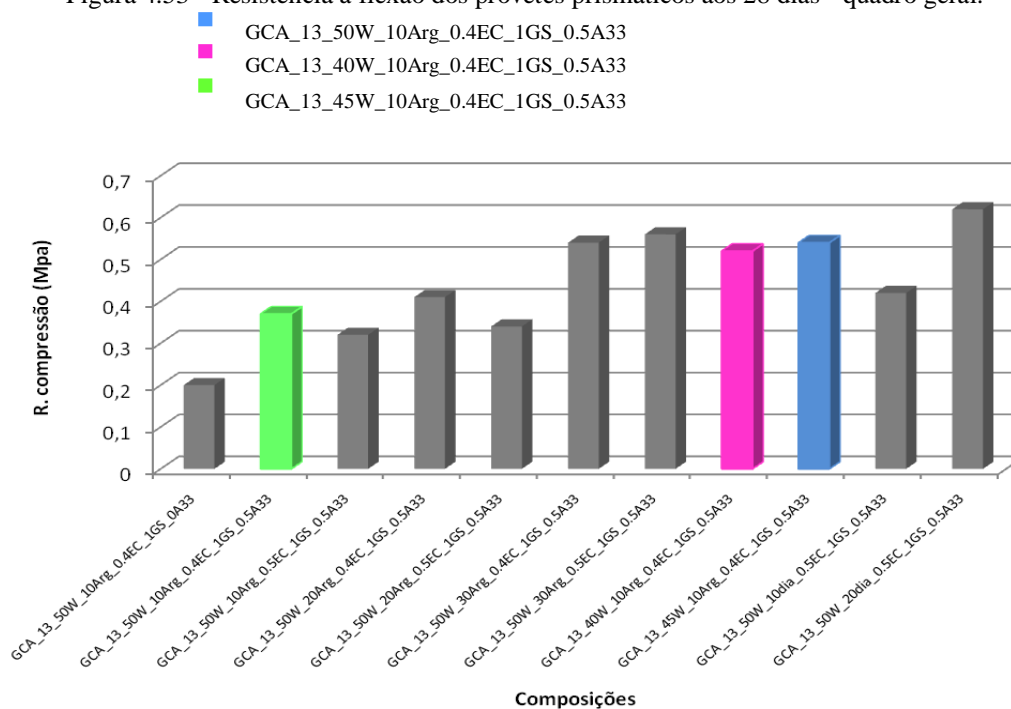


Figura 4.54 - Resistência dos provetes à compressão ao fim de 28 dias.

- GCA_13_50W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33
- GCA_13_40W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33
- GCA_13_45W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33

4.6.2.1 Efeito do metacaulino e da diatomite na resistência à flexão e à compressão

Nas figuras 4.55 e 4.56 mostra-se o efeito do teor em metacaulino e em diatomite, respectivamente, sobre a resistência mecânica.

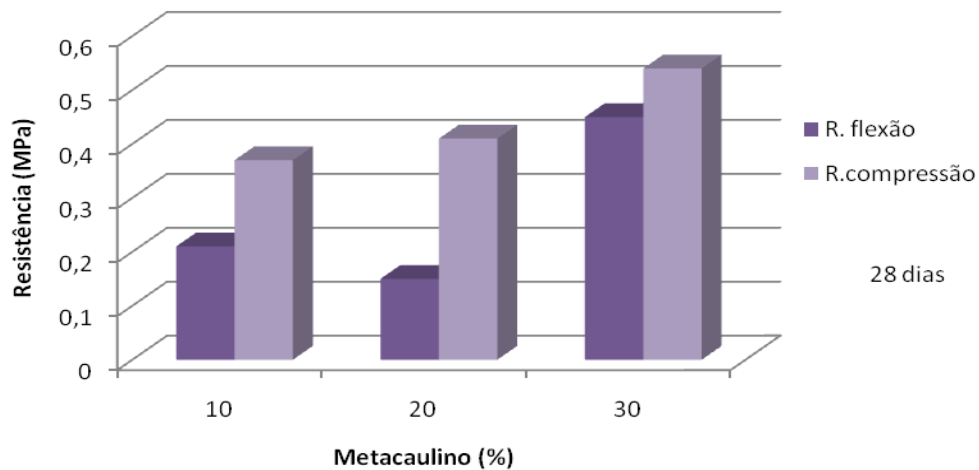


Figura 4.55 - Efeito da quantidade de metacaulino, argical 1200, nas propriedades mecânicas do provete prismático.

À medida que se aumenta a percentagem de metacaulino também aumentam as resistências à flexão e à compressão.

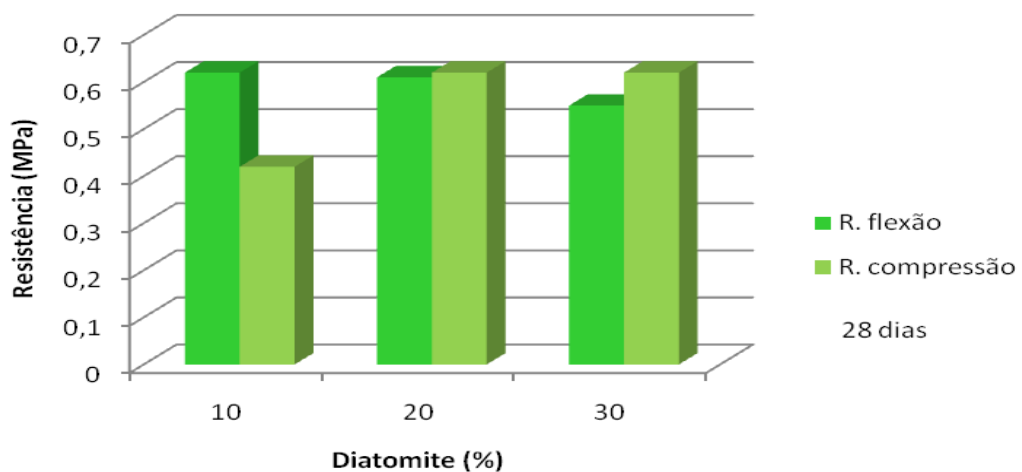


Figura 4.56 - Efeito da % de diatomite nas propriedades mecânicas dos provetes prismáticos.

4.6.2.2 Efeito do éter de celulose (EC) na resistência à flexão e à compressão

Nas Figuras 4.57 e 4.58 encontra-se o efeito do agente retentor de água, EC, sobre as propriedades mecânicas dos provetes prismáticos ensaiados.

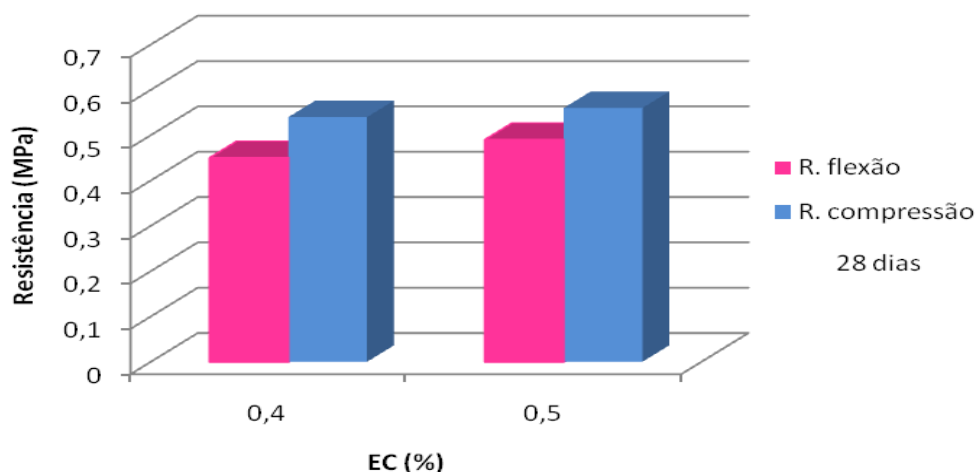


Figura 4.57 – Influência do teor em éter de celulose, EC, nas propriedades mecânicas dos provetes prismáticos.

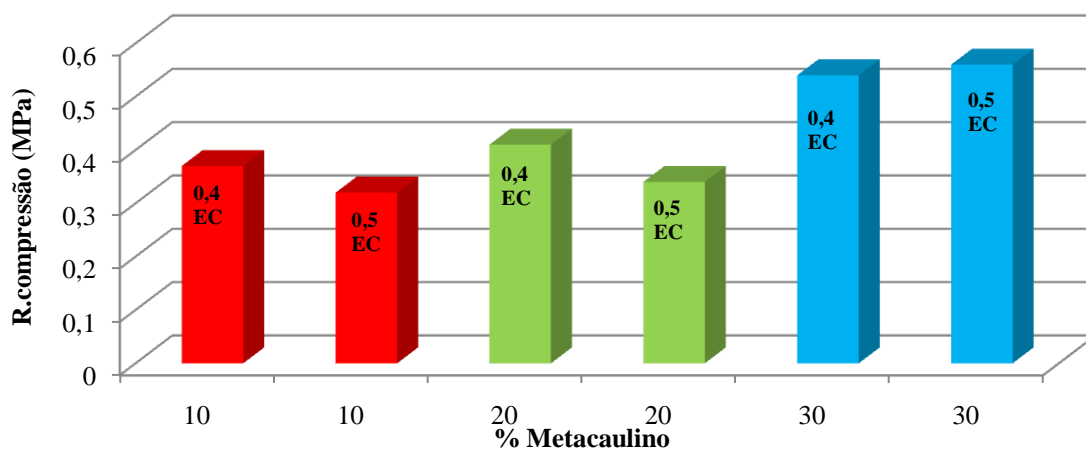


Figura 4.58 - Efeito do teor em éter de celulose, EC, na resistência à compressão.

O agente retentor de água, éter de celulose, parece não ter grande influência nas propriedades mecânicas da argamassa de cal.

4.6.2.3 Efeito do agente espessante (A33) nas propriedades mecânicas

Na Figura 4.59 verifica-se o efeito da adição de 0.5% do agente adesivo (Acril 33) sobre a massa total de sólidos, nas propriedades mecânicas.

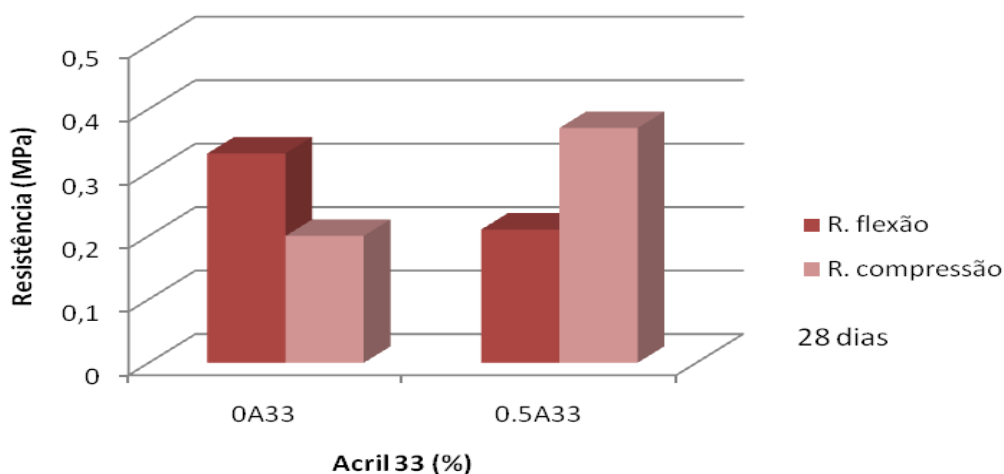


Figura 4.59 - Efeito da presença do agente adesivo acril 33 (A33) nas propriedades mecânicas dos provetes.

A adição de 0,5% de acril33 provoca uma inversão na relação entre a resistência à flexão e a resistência à compressão. A razão entre estes dois métodos de ensaio (flexão/compressão) dá uma inibição da rigidez do material. O facto da amostra sem agente adesivo ter um valor superior á flexão do que à compressão, ao contrário da amostra sem acril33, poderá indicar uma maior rigidez quando o agente adesivo é introduzido.

A Figura 4.60 mostra o efeito do aumento da quantidade de água nas propriedades do material. À medida que se aumenta a quantidade de água de amassadura reduz-se as propriedades mecânicas da argamassa. Isto explica-se facilmente, uma vez que quanto mais água tiver o material, mais poroso ele é e mais frágil se torna.

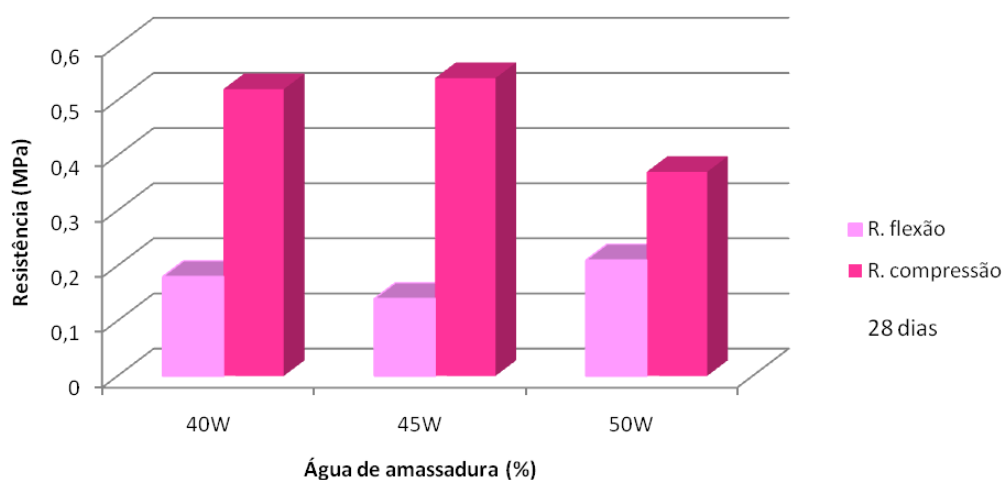


Figura 4.60 - Efeito da percentagem de água de amassadura sobre as propriedades mecânicas..

4.6.3 Capilaridade

A absorção de água por capilaridade traduz a velocidade de absorção de uma argamassa baseada no coeficiente de capilaridade e da quantidade de água absorvida. Com base nas curvas de absorção de água por capilaridade, determinou-se os coeficientes de capilaridade (C) (tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Coeficiente de capilaridade das argamassas de grout com 50% de água (W).

Amostra	Coeficiente de capilaridade (C) (kg/m ² .h ^{0.5})
GCA_13_50W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	16,55
GCA_13_50W_20Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	16,96
GCA_13_50W_30Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	14,45
GCA_13_50W_30Arg_0.5EC_1GS_0.5A33	13,48
GCA_13_50W_10Arg_0.4EC_1GS_0A33	10,82
GCA_15_50W_10Dia_0.5EC_1GS_0.5A33	12,11
GCA_15_50W_20Dia_0.5EC_1GS_0.5A33	14,64

Da análise da tabela 4.5 verifica-se que a amostra isenta de agente adesivo (A33) é a que apresenta menor coeficiente de capilaridade ($C = 10,82 \text{ kg/m}^2.\text{h}^{0.5}$). Em relação à percentagem de metacaulino o coeficiente de capilaridade diminui com o aumento do teor de metacaulino acrescentado.

Tabela 4.6 - Comparação do coeficiente de capilaridade de três caldas de cal com a mesma composição mas com diferentes quantidades de água (40, 45, 50%).

Amostra	Coeficiente de capilaridade (C) (kg/m ² .h ^{0,5})
GCA_13_50W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	16,55
GCA_13_45W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	15,23
GCA_13_40W_10Arg_0.4EC_1GS_0.5A33	10,82

Na tabela 4.6 compara-se a influência do teor em água na capilaridade e, como seria de esperar, quanto maior for a quantidade de água da argamassa maior é o coeficiente de capilaridade.

4.7 Síntese dos resultados

No ensaio de reologia foi possível observar-se, através do perfil em patamar, o fenómeno de reconstituição estrutural nas argamassas, pela evolução da área de histerese nas curvas de fluxo (torque em função da velocidade de corte). O fenómeno de destruição traduz-se na presença de uma histerese nas curvas ascendentes e descendentes na velocidade de corte. A subida do torque indica uma reconstituição estrutural enquanto esteve no repouso. Assim sendo, quanto maior a área de histerese maior a reconstituição estrutural dada [Banfill, 2003; Paiva, Velosa, Veiga, Ferreira, 2010].

Estas curvas permitiram concluir que o comportamento das caldas em estudo se adequava ao modelo de Bingham, podendo calcular-se a tensão de cedência e a viscosidade das caldas. Para esse cálculo, utilizou-se as curvas em regime de velocidade descendente por serem mais fiáveis.

Sobre o efeito do retentor de água (éter de celulose – MHPC) pode-se concluir que existe um valor (0,6% EC) que assegura condições óptimas de trabalhabilidade em relação à argamassa base. O éter de celulose, EC, é um bom agente espessante, uma vez que aumenta a viscosidade e a coesão dos materiais, melhorando assim a trabalhabilidade e a adesão nas argamassas onde são usados. Há medida que se aumenta os teores em éter de celulose, aumentam também os valores de h e g.

O efeito do agente plastificante ou redutor de água (gluconato de sódio – GS) é promover o decréscimo da quantidade de água a usar na amassadura e fluidificar o material. Em relação à argamassa base GCA_12_60W_0.6EC, sobre a qual foi feito o estudo do efeito do gluconato de sódio, este aumenta a viscosidade e aumenta também a tensão de cedência. Olhando para o efeito isolado do gluconato de sódio, não se verifica grandes alterações da viscosidade (h diminui muito ligeiramente) e em relação à tensão de cedência esta diminui com o aumento do teor em GS. Conclui-se, assim, que a adição do gluconato de sódio nas caldas de injeção estudadas poderá não ser tão importante quanto o esperado e será um bom objecto de estudo para próximos trabalhos.

Depois de se estudar o efeito de alguns adjuvantes, observou-se o efeito de aditivos (metacaulino e diatomite) sobre a argamassa base (GCA_12_60W), em substituição do ligante – 10 e 20%, e não se verificou grandes alterações em relação aos valores de viscosidade (h); mas em relação à tensão de cedência, esta aumenta à medida que se aumenta o teor em metacaulino ou em diatomite. A diatomite consegue provocar maiores valores de h e de g do que o metacaulino, talvez devido ao seu grau de finura.

Para avaliar a injectabilidade das caldas de cal, desenvolveram-se provetes de tijolo para simular a situação de “in situ”. Os provetes de tijolos após injeção também são importantes para a realização dos ensaios de aderência. Um dos objectivos principais deste estudo tem como finalidade saber se a calda de cal estudada adere à superfície onde é colocada, se funciona como uma cola. Mediu-se a resistência ao arrancamento nos provetes de tijolo, mas devido à fraca sensibilidade do dinamómetro não se obteve resultados numéricos.

Ensaiou-se diversos provetes de tijolos, usando uma PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester), para estudar o tempo de propagação na calda de cal e no respectivo reboco. Concluiu-se que o tempo de propagação é menor, de um modo geral, na zona da calda do que na zona do reboco, o que significa que a velocidade de propagação naquela zona é superior, sendo portanto esta menos porosa e mais compacta do que o reboco.

Através da avaliação da permeabilidade à água a baixa pressão, comprovou-se que o facto de os provetes terem estado em situações diferentes de cura, uns em estufa a 20°C e 65 HR e outros à temperatura ambiente e sujeitos a ciclos de molhagem diários, afecta

visivelmente a capacidade de absorção de água. Verifica-se também que as composições estudadas não apresentam a mesma linha de comportamento. Algumas das composições apresentam a zona da calda mais compacta do que o respectivo reboco, sendo nesta situação a absorção de água feita lentamente. Outras composições apresentam o efeito exactamente oposto, onde o reboco é que apresenta uma absorção menor do que na zona da calda.

Em relação às argamassas de reboco, verificou-se que a rotura se deu principalmente na interface chapisco – 1ª camada de reboco, o que é bastante positivo. Em relação à zona da calda, observou-se que a rotura se deu na interface calda – 2ª camada de reboco. Aparentemente a calda à entrada do provete apresentava-se bastante carbonatada, encontrando-se bastante rija e compactada, o que era esperado pelo fácil contacto com o dióxido de carbono. Já no interior da calda, e devido à dificuldade de penetração do dióxido de carbono, parece não ter havido carbonatação apreciável. Num próximo estudo poderá ser proposto efectuar uma análise de ATG da calda. Seria também positivo melhorar-se a molhagem na zona da calda, pois a água também é muito importante para se melhorar a reacção do metacaulino.

Com o objectivo de se perceber a sua compatibilidade das caldas de injeção com os substratos adjacentes realizaram-se ensaios mecânicos e físicos, tais como, ensaios à retracção linear, à resistência mecânica à flexão e à compressão e ensaios de capilaridade. As composições desenvolvidas encontram-se dentro dos valores aceitáveis. Segundo Veiga, [Veiga, 2003] a resistência à flexão deve estar entre 0,2 e 0,7 MPa e a resistência à compressão entre 0,4 e 2,5 MPa, que são os intervalos compatíveis com o revestimento de edifícios antigos.

Quanto à retracção livre, o valor máximo tabelado para este tipo de argamassas é de 4 % [Tavares et al. 2007], estando a maioria das argamassas estudadas abaixo desse limite.

Quanto à capilaridade conclui-se que a quantidade de água de amassadura tem uma grande influência sobre o coeficiente de capilaridade. Os valores do coeficiente de capilaridade encontram-se situados entre 10,82 e 16,96 kg/m².h^{0.5}. Quanto maior for a quantidade de água de amassadura maior será o valor do coeficiente de capilaridade, reflectindo-se igualmente sobre os valores da resistência mecânica.

Foi possível desenvolver a partir da caracterização reológica, caldas de cal para a consolidação de revestimentos em edifícios. Estas caldas baseiam-se em cal aérea e contêm aditivos pozolânicos. Para se adequar à injeção nos destacamentos foram também introduzidos alguns adjuvantes.

5 Conclusões

Neste trabalho estudaram-se caldas de cal passíveis de serem injectadas, segundo a técnica de *grouting*, para a consolidação de destacamentos, fundamental para a recuperação do património arquitectónico nacional.

O desenvolvimento das caldas de cal começou pelo estudo prévio do seu comportamento reológico. Avaliou-se o efeito de alguns adjuvantes, como o éter de celulose, o gluconato de sódio e o acril 33, sobre o comportamento reológico nas caldas de cal e também o efeito de dois aditivos, o metacaulino e a diatomite. Teve-se subjacente as características de duas argamassas comerciais de injeção, utilizadas para se definir os limites dos parâmetros reológicos das novas caldas estudadas, tendo sido, assim, possível desenvolver dez composições distintas de caldas de cal para injeção.

Efectuaram-se ensaios mecânicos e físicos às respectivas argamassas, com a finalidade de se avaliar a sua compatibilidade com os substratos adjacentes. Simulou-se também a consolidação de destacamentos através do desenvolvimento de provetes de tijolo, que permitiu observar a injectabilidade das caldas de injeção num meio semelhante ao verificado “*in loco*”.

As composições desenvolvidas apresentaram baixos valores de resistência mecânica, o que as torna compatíveis com o suporte. Resistências mais elevadas introduziriam tensões adicionais ao sistema, o que seria prejudicial durante o envelhecimento.

Não foi possível obter-se resultados quantitativos relativos à resistência ao arrancamento nos provetes de tijolo devido à falta de sensibilidade do aparelho (dinamómetro). Qualitativamente, contudo, verificou-se que no interior do reboco as caldas de cal não se encontravam totalmente carbonatadas, o que é justificável pela ausência de ar no interior de reboco, dificultando a difusão das moléculas de dióxido de carbono pelos poros do reboco. E assim a carbonatação das caldas de cal ocorre lentamente.

As caldas de cal desenvolvidas neste trabalho mostraram ter características reológicas adequadas para aplicações por injeção, boa compatibilidade mecânica com os substratos e também boa «curtição» com os destacamentos. Todos estes aspectos abrem boas perspectivas para a sua utilização na recuperação do património arquitectónico nacional,

mas faltam ainda testes *in loco* que permitam chancelar a sua utilização e divulgação pelo público interessado.

Bibliografia

- [1] AGUIAR, José; CABRITA, A.M. Reis; APPLETON, João, (2000 a) – *Guião de apoio à reabilitação de edifícios habitacionais, volume 1*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [2] AGUIAR, José; CABRITA, A.M.Reis; APPLETON, João, (2000 b) – *Guião de apoio à reabilitação de edifícios habitacionais, volume 2*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [3] ALVAREZ, José; SEQUEIRA, Cristina; COSTA, Marta (2005) – *Ensinamentos a retirar do passado histórico das argamassas* – Em 1º Congresso Nacional de argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- [4] ALMEIDA, Nuno Gouveia; FARIA, Paulina; PINTO, Ana Paula (2007) – *Argamassas com base em cal aérea e cinzas de casca de arroz para a conservação do património construído*.
- [5] BANFILL, P.G. (1983) - *Structure and reology of cement based Systems* – Proc. Materials Research Society Symposium, 289, 149-160.
- [6] BANFILL, P.G. (1990) – *Use of the viscocorder to study the rheology of fresh mortar* – Magazine of Concrete Research, 42, 213-221.
- [7] BANFILL, P.G. (2003) – *The reology od cement and concrete* – a review, Proc. of 11th international congresso n the chemistry of Cement, 50-62.
- [8] CAMÕES, Aires (2005) – *Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos do betão fresco* – Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil.
- [9] CARDOSO, Fábio (2009) – *Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico*. Tese de douturamento. Universidade de São Paulo - Escola Politécnica – São Paulo.
- [10] COUTINHO, A. de Sousa (1998) – *Fabrico e Propriedades do Betão* – Volume I. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2ª edição, Lisboa.

- [11] COUTINHO, Joana (2002) – *Materiais de construção 2: 1ª parte Ligantes e caldas* - FEUP - Universidade do Porto (Actualização em 2006).
- [12] FARIA, Maria Paulina (2004) - *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes* – Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, FCT/UNL.
- [13] GASPAR, Pedro lima; COLEN, Inês Flores; BRITO, Jorge de (2007) – *Técnicas de diagnóstico e classificação de anomalias por perda de aderências em rebocos*. Universidade Técnica de Lisboa.
- [14] GONÇALVES, Teresa (2002) – *Pesquisa de mercado sobre revestimentos para paredes sujeitas à acção de sais solúveis*. Cadernos de Edifícios nº2. Lisboa: LNEC, Outubro.
- [15] HENRIQUES, Fernando M. A. – *Humidade em paredes*, 2ª edição. LNEC. Edifícios nº1. 1994.
- [16] Instituto Português da Qualidade (2002) – *Cal de construção, Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. NP EN 459-1 2002. Lisboa: IPQ.
- [17] ILLSTON, J.M., DOMONE, P.L.J. (2005) – *Construction materials their nature and behavior* – Spon Press, third edition. London and New York. Pg. 117-120.
- [18] LUSO, E.; LOURENÇO, P., B. ; FERREIRA, R: M. (2007) - *Injecções para consolidação de construções em terra*. Revisão do conhecimento e métodos de ensaio. Comunicação ao 5.º Seminário de Arquitectura de Terra (V ATP), Universidade de Aveiro, Aveiro, 10-13 Outubro.
- [19] MAGALHÃES, Ana Cristian (2002) – *Patologia de Rebocos Antigos*. Cadernos de Edifícios nº2. Lisboa: LNEC, Outubro.
- [20] MAGALHÃES, Ana Cristian; VEIGA, Maria do Rosário; COSTA, Dória (2009) – *Caracterização do estado de conservação de revestimentos de paredes antigas através de ensaios “in situ”. Dois casos de estudo*.
- [21] MARGALHA, Maria Goreti; VEIGA, Maria do Rosário; BRITO, Jorge de (2006) – *Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea*.

- [22] MARGALHA, Maria Goreti (1997) – *O uso de cal em argamassas no Alentejo*. Dissertação apresentada à Universidade de Évora para obtenção do grau de mestre em recuperação do património arquitectónico e paisagístico. Évora: Universidade de Évora.
- [23] MARGALHA, Maria Goreti (2008) – *Conservação e recuperação de construções em taipa*. – Acção de formação - Taliscas – Odemira – Abril.
- [24] MARTINS, Cátia Sofia (2008) – *Estudo e desenvolvimento de pastas de cal para a readaptação de rebocos antigos* – Tese de mestrado. Universidade de Aveiro – Departamento de Engenharia Civil.
- [25] MENDONÇA, Paulo (2005) – *Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados*. Guimarães: Universidade do Minho. Tese de doutoramento. [Consult. Novembro 2007].
- [26] MOORHEAD, D (1986) – *Cementation by carbonation of hydrated lime*. Elmsford, N.Y.: ACI/Pergamon Press/Elsevier, 1986. Cement and Concrete Research, Vol 16, pg. 700-708.
- [27] PAIVA, Helena (2005) – *Caracterização reológica de argamassas* – Tese de mestrado. Universidade de Aveiro.
- [28] PAIVA, H.; SILVA, L.M.; LABRINCHA, J.A.; FERREIRA, V.M. (2007) – *Efeito dos Adjuvantes sobre a Reologia de uma Argamassa*. – Universidade de Aveiro.
- [29] PAIVA, H.; SILVA, L.M.; LABRINCHA, J.A.; FERREIRA, V.M. (2006) – *Caracterização Reológica de Argamassas*. – Universidade de Aveiro.
- [30] PAIVA, H.; VELOSA, A.; FERREIRA, V.M.; (2010) – *Effect of maturation time on the fresh and hardened properties of an air lime mortar*, *Cement and Concrete Research*, 40, 447-451.
- [31] PAULO, Raquel Sofia Nascimento (2006) – *Caracterização de argamassas industriais* – Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro.

- [32] PENAS, Filipa (2008) – *Argamassas de cal hidráulica para revestimentos de paredes* – Tese de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa. Novembro.
- [33] RIBEIRO, Alejandro; EUSÉBIO, Maria Isabel (2002) – *Tintas de cal e de silicatos*. Cadernos de edifícios nº2. Lisboa: LNEC, Outubro.
- [34] SEABRA, M.P.; PAIVA, H.; LABRINCHA, J.A.; FERREIRA, V.M. (2007) – Efeito dos adjuvantes no comportamento reológico de argamassas de cal aérea – Universidade de Aveiro/ CICECO.
- [35] SEQUEIRA, Ana Cristina; FRADE, Dina; GONÇALVES, Paulo (2007) – *Cal hidráulica – um ligante para a reabilitação* – Secil Martingança, SA..
- [36] SILVA, Gomes da (2003) – *Acidentes patológicos em paredes de edifícios; origem, formas de manifestação, medidas preventivas, reparações, exemplos de acidente, Doc.7* – Paredes de Edifícios CPP 510. Lisboa: LNEC.
- [37] TAVARES, M. L.; FRAGATA, A.; VEIGA, M^a R. (2007) – A consolidação da falta de aderência de rebocos antigos – um estudo com diferentes argamassas para grouting. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, Novembro.
- [38] TAVARES, M. L. (2009) – A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos - Uma metodologia de estudo e reparação. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa/Faculdade de Arquitectura, Abril de 2009. Tese elaborada no laboratório Nacional de Engenharia Civil, para obtenção do grau de Doutor em Arquitectura.
- [39] TOUMBAKARI, E. (2002) - *Lime-Pozzolan- Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Masonry Walls*. PhD Thesis, Dept Burgerlijke Bouwkunde, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- [40] VAN BALEN, K; VAN GEMERT (1994) – *Modelling lime mortar carbonation*. Materials and structures, Vol.27, 1994. Page 393-398. London: Rilem.
- [41] VEIGA, Rosário; AGUIAR, José (2002) – *Revestimentos de paredes em edifícios antigos*. Cadernos de edifícios nº2. Lisboa: LNEC, Outubro.
- [42] VEIGA, Rosário; CARVALHO, Fernanda (2002) – *Argamassas de Reboco para Paredes de Edifícios Antigos*. Cadernos de edifícios nº2. Lisboa: LNEC, Outubro.

- [43] VEIGA, Rosário; TAVARES, Marta (2002) – *Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura*. In Actas do Encontro: A indústria das tintas no início do séc. XXI. Lisboa: APTETI, Outubro.
- [44] VEIGA, Rosário (2006) – *Os revestimentos antigos e a identidade dos edifícios*. Arquitectura Ibérica. Reabilitação. Nº12.
- [45] VELOSA, Ana Luísa (2002) – *Influência das adições pozolânicas em argamassas de cal para a conservação de edifícios antigos*. Cadernos de edifícios nº2. Lisboa: LNEC, Outubro.